

ROBSON VITOR OLIVA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA NA
SUBSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA COMBINADO DE
GERAÇÃO DE VAPOR-VÁCUO POR BOMBAS SECAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

**Guaratinguetá - SP
2013**

Oliva, Robson Vitor

O Análise de viabilidade técnica-econômica na substituição de um
4 sistema combinado de geração de vapor-vácuo por bombas secas / Robson
8 Vitor Oliva – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
1 87 f : il.
a Bibliografia: f. 83

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

1. Vapor 2. Vácuo 3. Aço I. Título

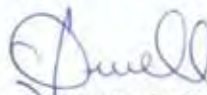
CDU 621.6.02(043)

ROBSON VITOR OLIVA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
Unesp-Feg



Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRÍGUEZ
UIFEI

Janeiro de 2013

DADOS CURRICULARES

ROBSON VITOR OLIVA

DADOS PESSOAIS: Nascimento: 05/03/1970 – Santo André - SP

Estado Civil: Casado

Nacionalidade: Brasileira

REG CREA: 0682358267

FORMAÇÃO ACADÊMICA

1990-1995 Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade de Taubaté - UNITAU

1984-1988 Ensino Profissional de nível técnico.
Formação: Técnico Eletrônico
Escola Técnica “Prof. Everardo Passos”. ETEP

Publicações:

- 2010 **Apresentação Oral no XXIV INTERNACIONAL SODEBRAS CONGRESS,**
Título: ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO.
- 2010 **Apresentação Oral no FORUM SUSTENTABILIDADE SESI/CIESP**
Título: USO SUSTENTÁVEL DE ÁGUA NA SIDERÚRGICA GERDAU-PINDA
- 2009 **Apresentação Oral no XIX INTERNACIONAL SODEBRAS CONGRESS 2009**
Título Estudo para reaproveitamento de energia solar
- 2006 **Apresentação Oral no XXVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e
Utilidades da Associação Brasileira de Metais e Metalurgia - ABM**
Título: PROCESSOS QUÍMICOS PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA DAS
ESTAÇÕES DE TRATAMENTOS DE ÁGUA

de modo especial, à minha família que durante todo esse tempo de pesquisa, foi a grande incentivadora para o término deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pela minha vida e por ter pessoas que amo ao meu lado, sempre me incentivando,

à minha esposa, pelo infindável companheirismo.

à minha mãe e ao meu pai, por terem me proporcionado tudo o que sou e tenho hoje.

as minhas filhas que sempre me apoiaram nos momentos difíceis.

ao Prof. Dr. Pedro Magalhães, por ter aceitado ser meu orientador e por ter me auxiliado na elaboração deste trabalho.

aos profissionais técnicos que me auxiliaram na obtenção das informações necessárias para o desenvolvimento desta obra.

a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

OLIVA, R. V. Análise de viabilidade técnica-econômica na substituição de um sistema combinado de geração de vapor-vácuo por bombas secas. 2012. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

As tecnologias tradicionais utilizadas na geração de vácuo para fabricação de aço são ejetores a vapor, bombas de vácuo de anel líquido e sistemas combinados entre esses dois. O sistema de ejetores de vapor tem uma capacidade de gerar um vácuo médio de 101 kPa (1 atm) a 0,1 Pa (0,01 mbar), as bombas de anel líquido chegam a apenas 3 kPa (30 mbar) e as bombas secas abrangem a faixa de 101 kPa (1 atm) até 67 Pa (0,67 mbar), faixa necessária para a aplicação em metalurgia secundária e é o limite desta tecnologia. Neste trabalho foi realizado estudo de caso no setor industrial que utiliza a geração de vácuo à ejetores a vapor superaquecidos a 250°C e 1,2 MPa (12 kgf/cm²) de pressão. O vácuo é necessário para a remoção de gases indesejáveis na composição do aço, como Nitrogênio, Oxigênio, Hidrogênio e Enxofre que causam fragilidades na estrutura cristalina. Atualmente têm surgido inovações tecnológicas para geração de vácuo para aplicações em VD (desgaseificação à vácuo), vácuos até 67 Pa (0,67 mbar) e para VOD (descarburação) para vácuos de 8-20 kPa (80-200mbar). Uma dessas inovações é a combinação de bombas mecânicas secas formando três estágios de vácuo, juntando várias tecnologias, sendo a primeira e segunda com rotor Roots e a terceira com rotor parafuso. Neste estudo o objetivo foi o de mensurar os rendimentos reais oferecidos pelo sistema de ejetores a vapor, juntamente com o rendimento da Caldeira em comparação com a nova tecnologia de bomba seca em aplicações siderúrgicas, apresentaremos as vantagens, desvantagens e custo benefício para a substituição do sistema de geração de vácuo. Representando uma redução de 92,7 % no consumo energético e 81,4% de redução dos custos operacionais.

PALAVRAS-CHAVE: vapor, ganho energético, vácuo, aço, desgaseificação, bombas mecânicas secas.

OLIVA, R. V. Technical-economical Viability Analysis in the replacement of a combined system of steam generation and dry-vacuum pump-. 2012. 87f. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Traditional technologies used to generate vacuum for steelmaking are steam ejectors, liquid ring vacuum pumps and systems combined of them. The steam ejector system has a capacity to generate a medium vacuum 101 kPa (1 atm) a 0,1 Pa (0,01 mbar), the liquid ring pumps only reach 3 kPa (30 mbar) and dried pump cover the range of 101 kPa (1 atm) até 67 Pa (0,67 mbar), band required for use in secondary metallurgy and is the limit of this technology. In this work was realized a case study in the industrial sector that uses the vacuum generation through steam ejectors superheated at 250 ° C and 1,2 MPa (12 kgf/cm²). The vacuum is needed for removal of undesirable gases in the composition of the steel as nitrogen, oxygen, hydrogen and sulfur which causes weakness in the crystalline structure. Currently there have been technological innovations for vacuum generation in applications in VD (vacuum degassing), vacuums until to 67 Pa (0,67 mbar) and VOD (decarburization) for vacuums of 8-20 kPa (80-200 mbar). One of these innovations is mechanical pumps dried formed by three-stage vacuum, joining various technologies, the first and second rotor roots and the third screw rotor. In this study the objective was to measure the real returns offered by the steam ejector system, along with the performance of the boiler compared to the new dry pump technology in steel making industry, will present the advantages, disadvantages and cost effective to replace the vacuum generating system. Representing a 92,7% reduction in energy consumption and 81,4 % reduction in operating costs.

KEYWORDS: steam, energy gain, vacuum, steel, degassing, dry pump.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Turbina de Heron	17
FIGURA 2 – Princípio de operação da caldeira Flamotubular	18
FIGURA 3 – Desenho funcional da caldeira flamotubular	18
FIGURA 4 – Caldeira flamotubular	19
FIGURA 5 – Princípio de operação da caldeira aquatubular	19
FIGURA 6 – Caldeira aquatubular	20
FIGURA 7 – Tanques de troca iônica, desmineralização	21
FIGURA 8 – Tanque de desaeração	22
FIGURA 9 – Processo de fabricação do aço	23
FIGURA 10 – Faixa de operação dos tipos de bombas de vácuo	25
FIGURA 11 – Processo de desgaseificação VD	26
FIGURA 12 – Processo de desgaseificação VOD	27
FIGURA 13 – Montagem típica de um ejetor a vapor	28
FIGURA 14 – Gráfico de pressão no ejetor a vapor	28
FIGURA 15 – Bomba ejetora a vapor	30
FIGURA 16 – Fotos dos ejetores fabricados pela Boc Edwards.....	31
FIGURA 17 – Ejetor a vapor com 5 estágios.....	31
FIGURA 18 – Curva de vazão do ejetor a vapor de múltiplos estágios.....	32
FIGURA 19 – Sistema combinado de ejetores a vapor e bombas de selo de água	33
FIGURA 20 – Sistema combinado de ejetor a vapor e bomba de anel líquido	33
FIGURA 21 – Detalhes construtivos das bombas de anel líquido	34
FIGURA 22 – Sistema combinado de ejetores a vapor com bomba de anel líquido fabricado pela empresa Nasch	35
FIGURA 23 – Detalhes funcionais da bomba de lóbulos da Omel.....	36
FIGURA 24 – Bomba de lóbulos da Omel	36
FIGURA 25 – Sistema combinado de bombas de lóbulos com anel líquido	37
FIGURA 26 – Sistema de desgaseificação com bombas mecânicas.....	38
FIGURA 27 – Bombas de lóbulos.....	39
FIGURA 28 – Mecanismo da bomba mecânica de garra.....	39
FIGURA 29 – Vários estágios da rotação da bomba de garra.....	40
FIGURA 30 – Bombas de vácuo Claw	41
FIGURA 31 – Desenho ilustrado da montagem mecânica das bombas secas	42
FIGURA 32 – Instalações das bombas secas em indústrias de aço.....	42
FIGURA 33 – Montagem modular das bombas secas	43
FIGURA 34 – Comparativo das curvas de vazão, ejetor a vapor, anel líquido, bomba seca	44
FIGURA 35 – Processo simplificado do sistema em estudo.....	46
FIGURA 36 – Caldeira abordada no estudo.....	47
FIGURA 37 – Arranjo da tubulação da caldeira Dedini	48
FIGURA 38 – Queimador Ingener	50
FIGURA 39 – Esquema do sistema de ejetor em estudo	53
FIGURA 40 – Desenho do sistema de vácuo com adição de aço	54
FIGURA 41 – Desenho do sistema de vácuo em forno panela	54
FIGURA 42 – Regime de operação da caldeira	55
FIGURA 43 – Curva de consumo específico da caldeira.....	56
FIGURA 44 – Consumo energético da caldeira.....	57
FIGURA 45 – Consumo específico de vapor em kg por tonelada de aço líquido	57
FIGURA 46 – Consumo energético de vapor Giga Joule por tonelada de aço líquido.....	58
FIGURA 47 – Fluxo de energias para produção de vácuo a partir de vapor	59

FIGURA 48 – Detalhe mecânico do conjunto de bomba seca	65
FIGURA 49 – Foto da bomba seca	66
FIGURA 50 – Sistema de vácuo proposto	66
FIGURA 51 – Sistema de vácuo para VD de 100 t.....	67
FIGURA 52 – Opções de utilização no sistema proposto	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Faixa de operação para sistema multi-estágios.....	32
TABELA 2 – Vantagens e desvantagens das tecnologias de bombas de vácuo	45
TABELA 3 – Dados do equipamento/ placa de identificação.....	48
TABELA 4 – Valores considerados para queima de GNP (10% de excesso de ar).....	49
TABELA 5 – Queimador	49
TABELA 6 – Composição do gás natural	52
TABELA 7 – Consumo de gás natural da caldeira	55
TABELA 8 – Tarifa do gás natural canalizado	60
TABELA 9 – Custo da energia elétrica.....	61
TABELA 10 – Custo operacional do sistema existente	63
TABELA 11 – Quantidades típicos de módulos de 3 estágios de vácuo	65
TABELA 12 – Dimensionamento do sistema de desgaseificação	69
TABELA 13 – Dimensionamento do sistema de sucção	69
TABELA 14 – Custo operacional do sistema proposto	70
TABELA 15 – Gases de efeito estufa do GN e respectivo GWP	72
TABELA 16 – Cálculo de emissão de CO ₂	73
TABELA 17 – Total de emissão dos gases de efeito estufa.....	73
TABELA 18 – Cálculo financeiro da recuperação de créditos de carbono.....	74
TABELA 19 – Cálculo de Payback simples	76
TABELA 20 – Cálculo de Payback descontado.....	77
TABELA 21 – Comparativo do custo operacional bombas vapor e mecânicas	80
TABELA 22 – Comparativo do custo operacional	80
TABELA 23 – Comparativo energético do consumo mensal	81

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – Cálculo de volume de GN para comercialização	50
EQUAÇÃO 2 – Conversão de m^3 para Nm^3	51
EQUAÇÃO 3 – Cálculo do preço do GN	60
EQUAÇÃO 4 – Cálculo da emissão dos gases de efeito estufa.....	71
EQUAÇÃO 5 – Cálculo do Payback simples	75
EQUAÇÃO 6 – Fluxo de caixa	76
EQUAÇÃO 7 – Cálculo do valor presente.....	77
EQUAÇÃO 8 – Cálculo do Payback descontado.....	77
EQUAÇÃO 9 – Cálculo do valor presente líquido	78
EQUAÇÃO 10 – Cálculo da taxa interna de retorno	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ASME	- Sociedade Americana de Engenharia Mecânica (do inglês <i>American Society Mechanical Engineer</i>)
FEA	- Forno elétrico a arco
FP	- Forno Panela
BOF	- Forno Básico a Oxigênio (do inglês <i>Basic Oxygen Furnace</i>)
COMGAS	- Companhia de Gás de São Paulo
FC	- Fluxo de Caixa
GN	- Gás Natural de uso industrial
GNP	- Gás Natural de petróleo
GWP	- Potencial de aquecimento global (do inglês <i>Global Warming Potential</i>)
HEI	- Instituto Troca de Calor (do inglês <i>Heat Exchange Institute</i>)
I	- Custo de capital
ICMS	- Imposto de circulação de mercadorias
IPCC	- Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (do inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
LRP	- Bomba de anel líquido (do inglês <i>Liquid Ring Pump</i>)
MDL	- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NR-13	- Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego
PBS	- Período de retorno simples (do inglês <i>pay back</i>)
PCI	- Poder calorífico inferior
PCS	- Poder calorífico superior do gás fornecido
PMTA	- Pressão máxima de trabalho admissível
SD	- Desgaseificação com adição de liga (do inglês <i>Side Stream</i>)
SRT	- Soprador rotativos de deslocamento positivo
SRTH	- Soprador rotativos de deslocamento positivo horizontal
SRTV	- Soprador rotativos de deslocamento positivo vertical
TIR	- Taxa Interna de Retorno
VD	- Desgaseificação a vácuo (do inglês <i>Vacuum Degassing</i>)
VOD	- Descarburação a vácuo (do inglês <i>Vacuum oxygen decarburizing</i>)
VP	- Valor presente
VPL	- Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
K	Kelvin
Cal	Calorias
CO _x	Óxido de carbono resultante da queima
FSC	Fator de super-compressibilidade dos gases
m ³ /h	metro cúbico hora
MP	Material particulado
NO _x	Óxido de nitrogênio resultante da queima
P1	Pressão da rede fornecimento
P2	Pressão no ponto de medição
Pa	Pascal
Patm	Pressão atmosférica em Pindamonhangaba
Patm	Pressão atmosférica local
Pm	Pressão da rede de distribuição de Gás Natural
Pr	Pressão atmosférica padrão 1 atm
SO _x	Óxido de Enxofre resultante da queima
T1	Temperatura do GN padrão concessionária
T2	Temperatura do Gás Natural Normalizado
Tm	Temperatura ambiente no local de medição
Tr	Temperatura de referência do contrato de fornecimento Comgas
V1	Volume da medição em m ³ concessionária
V2	Volume do Gás Natural Normalizado
VFinal	Volume em m ³ Comgas após consumido
V _{Final}	Volume em m ³ Comgás
Vmedido	Volume em m ³ sem correção de pressão e temperatura
V _{medido}	Volume m ³ Comgás medido
Wh	Watt hora
η	Rendimento do motor elétrico

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE EQUAÇÕES	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Caldeiras	17
2.1.1 Aspectos gerais	17
2.1.2 Caldeira flamotubular	18
2.1.3 Centrais aquatubular	19
2.1.4 Desmineralizadores e abrandadores	20
2.1.5 Desaeradores	21
2.2 Bombas de Vácuo	23
2.2.1 Aplicações do vácuo na siderurgia	23
2.2.1.1 Aplicação em sistema VD	26
2.2.1.2 Aplicação em sistema VOD	27
2.2.2 Bombas de vácuo com ejetores a vapor	27
2.2.3 Sistema combinado de ejetores a vapor com bomba mecânica seca	33
2.2.4 Bombas de vácuo mecânica	34
2.2.4.1 Bombas de vácuo com anel líquido	34
2.2.4.2 Bombas de vácuo com lóbulos	35
2.2.4.3 Bombas de vácuo combinadas entre Roots e anel líquido	37
2.2.4.4 Bombas de vácuo mecânicas secas	37
2.2.5 Comparativo das tecnologias de bombas de vácuo	43
3 ESTUDO DE CASO	46
3.1 Aspectos gerais	46
3.2 Sistema atual de produção de vácuo	46
3.3 Caldeira	47
3.3.1 Queimador	49
3.3.2 Metodologia de medição do volume de GN	50
3.3.3 Características do GN	52
3.4 Sistema atual de ejetores a vapor	52
3.5 Consumo específico atual do sistema de geração de vácuo	55
3.5.1 Consumo específico do sistema de geração de vapor	55
3.5.2 Consumo específico do sistema vapor/vácuo	57
3.5.3 Consumo energético	58
3.5.4 Aspectos ambientais	58
3.5.4.1 Contaminação da água	58
3.5.4.2 Contaminação do ar	58
3.6 Custo operacional do sistema existente	59
3.6.1 Cálculo do custo do gás natural	60
3.6.2 Cálculo do custo de energia elétrica	61
3.6.3 Custo operacional do sistema de geração de vácuo	61

4 SISTEMA DE VÁCUO COM BOMBA MECÂNICA SECA.....	64
4.1 Aspectos gerais	64
4.2 Bomba de vácuo Edwards	65
4.3 Sistema proposto de produção de vácuo.....	66
4.3.1 Utilidades.....	68
4.3.1.1 Consumo de água industrial	68
4.3.1.2 Consumo de energia elétrica.....	68
4.4 Consumo específico do sistema proposto.....	69
4.5 Custo operacional do sistema proposto	69
5 RECUPERAÇÃO DE CRÉDITO DE CARBONO.....	71
5.1 Metodologia de cálculo das emissões dos gases de efeito estufa	71
5.2 Cálculo de emissão de CO ₂	72
5.3 Cálculo financeiro de recuperação de crédito de carbono	74
6 RETORNO FINANCEIRO	75
6.1 Métodos de avaliação financeira	75
6.2 Payback simples	75
6.3 Payback simples descontado	76
6.4 Valor presente líquido	78
6.5 Taxa interna de retorno.....	79
7 COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS	80
7.1 Comparativo financeiro	80
7.2 Comparativo energético.....	81
8 CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho foi elaborar um comparativo de custo benefício de um sistema existente de produção de alto vácuo em relação ao sistema de bomba mecânica seca de última geração utilizada no processo de metalurgia secundária nas Aciarias de aços especiais.

O uso de novas tecnologias é uma busca constante que impacta na rentabilidade e no futuro de um ramo de atuação, por esse motivo será demonstrado um comparativo da tecnologia ainda utilizada e uma nova tecnologia que proporciona um rendimento energético muito melhor, agilidade no processo de fabricação e uma menor contaminação do meio Ambiente.

Para poder entender melhor essas tecnologias na seção 2.1 serão apresentados os vários equipamentos que são utilizados atualmente para a geração de vapor que opera conjuntamente com o ejetor na geração de vácuo.

O funcionamento do sistema de geração de vácuo será apresentado na seção 2.2 utilizando várias tecnologias existentes atualmente e largamente aplicados como bomba ejetora á vapor, bomba de anel líquido, bomba de lóbulos, bomba mecânica seca e sistema combinando essas tecnologias. O que determina a sua utilização é o melhor rendimento energético e custo operacional, principalmente atender as exigências do processo a que se aplica.

Após conhecimento das tecnologias tem-se nas seções 3.2 a 3.4 as características técnicas e operacionais do sistema atual de desgaseificação do aço, composto por um tratamento de água clarificada e desmineralizada, uma caldeira aquatubular a gás natural e um sistema de produção de vácuo utilizando ejetor a vapor, esse sistema já foi o mais utilizado no mundo para a desgaseificação de aços de construção mecânica, onde é exigido um controle muito maior dos gases existentes na produção do aço.

Na seção 3.5 é realizada uma análise energética do sistema atual durante os anos de 2009, 2010 e 2011, considerando os níveis de produção e o perfil de utilização da caldeira, principal insumo para geração de vácuo.

Na seção 3.6 é feita uma análise do custo operacional real considerando todos os insumos, mão de obra e encargo para operação do sistema de vácuo atual

Na seção 3.7 é apresentado uma nova tecnologia para a desgaseificação do aço em metalurgia secundária que é a utilização de bomba mecânica seca de alto vácuo. Apesar de já existirem, elas não eram aplicadas na fabricação do aço porque não suportavam a quantidade

de pó gerado no processo de desagaseificação e não tinham a mesma capacidade de atingir o vácuo final próximo a 67 Pa (0,67 mbar) exigido no processo. Com o desenvolvimento de um sistema de bomba mecânica seca combinando três tecnologias diferentes foi possível conceber um sistema que suportasse as condições agressivas e exigentes do processo de desagaseificação.

Na seção 4.5 apresenta-se a análise energética e o custo operacional do sistema de vácuo proposto considerando a mesma condição operacional da atual.

No capítulo 5 demonstra-se a análise financeira e ambiental para a recuperação dos créditos de carbono que são permitidos com a desativação da caldeira, deixando de emitir os gases de efeito estufa provenientes da queima do gás natural e reduzindo a dependência deste insumo.

No capítulo 6 é feita a análise de viabilidade financeira que verifica se é viável a substituição do sistema atual em funcionamento por bomba seca, e se o investimento é pago em curto prazo e oferece ganhos reais.

No capítulo 7 são relacionados os comparativos financeiros e energéticos da substituição do sistema atual por essa nova tecnologia aplicada à metalurgia secundária,

A conclusão do trabalho é apresentada no capítulo 8.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem o objetivo de oferecer uma base para a derivação das hipóteses e explicação da fundamentação deste trabalho, assim como fazer referência a trabalhos anteriormente publicados situando a evolução do assunto.

Será abordado preliminarmente as tecnologias utilizadas atualmente e a tecnologia mais recente para geração de vácuo em metalurgia secundária para a fabricação de aço especial.

A caldeira é um dos componentes principais do sistema atual que opera conjuntamente com o ejetor a vapor na geração de vácuo e é o principal consumidor de energia que por consequência tem o maior custo operacional merecendo avaliação diferenciada no estudo.

2.1 Caldeiras

2.1.1 Aspectos gerais

A utilização do vapor é muito antiga, tem-se a descrição feita por Heron de um brinquedo a vapor, demonstrado na figura 1. Heron de Alexandria, Egito, em 120 a.C. construiu um dispositivo esférico, que girava movido pela pressão de escape do vapor – princípio de ação e reação. Denominou o seu invento de Eulópila (Amaral,2012).

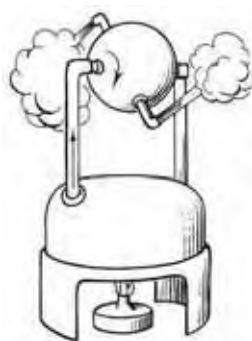


Figura 1: Turbina de Heron (MATAIX, 1973)

A utilização do vapor é muito difundida e teve seu maior avanço após a revolução industrial, onde se inventou muitas máquinas movidas através da pressão do vapor como locomotivas, moinhos, automóveis entre outros. Com o desenvolvimento tecnológico foram substituídas por equipamentos elétricos mais eficientes e menores.

O uso de caldeiras para geração de vapor ainda é utilizado em larga escala no ramo industrial, hoje está em alta sua aplicação em usinas termoeletricas ou caldeiras de recuperação de calor.

2.1.2 Caldeira flamotubular

As caldeiras flamotubulares foram projetadas para permitir a melhoria na circulação da água e aumentar a área da superfície de aquecimento. Como demonstrado na figura 2, a água envolve a tubulação aquecida por gases (LEITE & MILITÃO,2008).

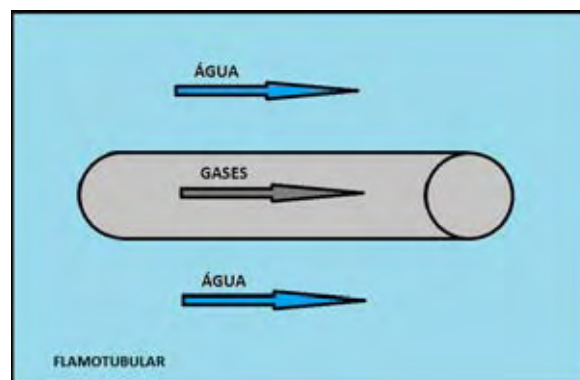


Figura 2: Princípio de operação da caldeira Flamotubular

Em uma caldeira flamotubular o vapor é obtido por aquecimento de um grande volume de água contida num reservatório, e por intermédio de gases aquecidos produzidos por combustão circulam em tubos imersos no reservatório de água, como demonstrado na figura 3(a) e (b). Esta técnica é a mais usada para produção de vapor (LEITE & MILITÃO,2008).

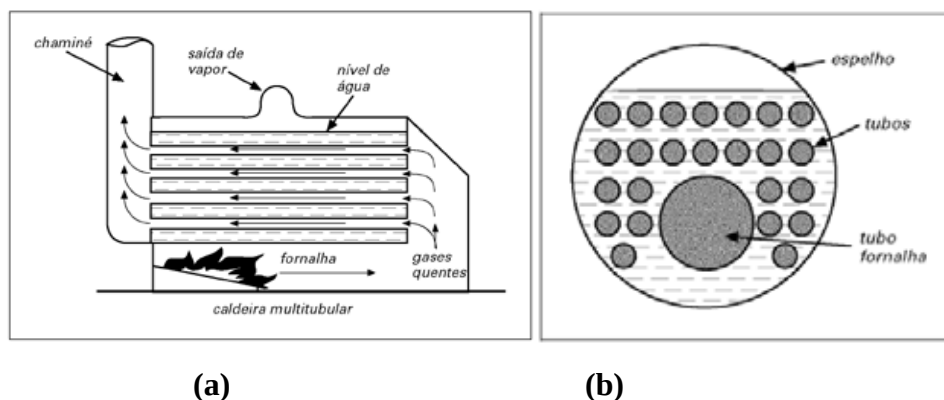


Figura 3: Desenho funcional da caldeira flamotubular: (a) longitudinal; (b) frontal (LEITE & MILITÃO,2008)

Na figura 4 pode-se observar uma caldeira flamotubular de uso comum utilizado para a geração de vapor.

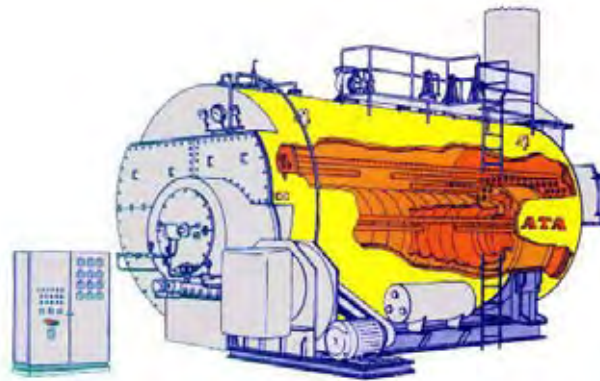


Figura 4: Caldeira Flamotubular (CEFET,2012)

2.1.3 Caldeiras aquatubulares

Na caldeira aquatubular a água fica do lado de dentro dos tubos e os gases de combustão do lado de fora, conforme figura 5.

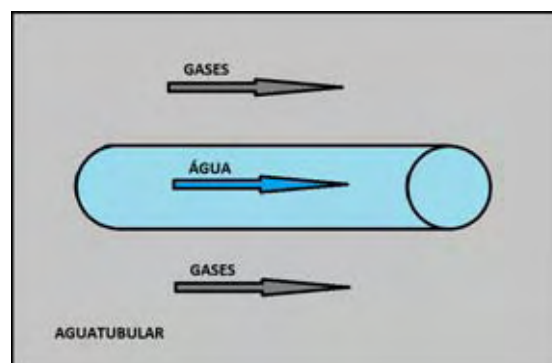


Figura 5: Princípio de operação da caldeira aquatubular

As limitações de pressão e capacidade das caldeiras flamotubulares deram lugar às caldeiras aquatubulares, as quais têm sido continuamente modificadas e aperfeiçoadas até chegar aos modelos atuais, como mostrado na figura 6 (a) e (b). O emprego da caldeira aquatubular é inevitável quando necessária à obtenção de grandes capacidades e elevadas pressões de vapor. A subdivisão interna destas caldeiras em coletores e tubos de pequeno diâmetro, permite que sejam construídos com chapas de baixa espessura aptas para suportar altas pressões. Devido sua forma, a quantidade de água é relativamente pequena, permitindo desenvolver em um reduzido volume uma grande superfície de aquecimento. A disposição das chapas de forma conveniente para a melhor transmissão de calor em volta de uma ampla

câmara de combustão, independente da estrutura resistente da caldeira (GOULART & BARBERINO,2003).

Na figura 6 tem-se um exemplo de caldeira aquatubular:

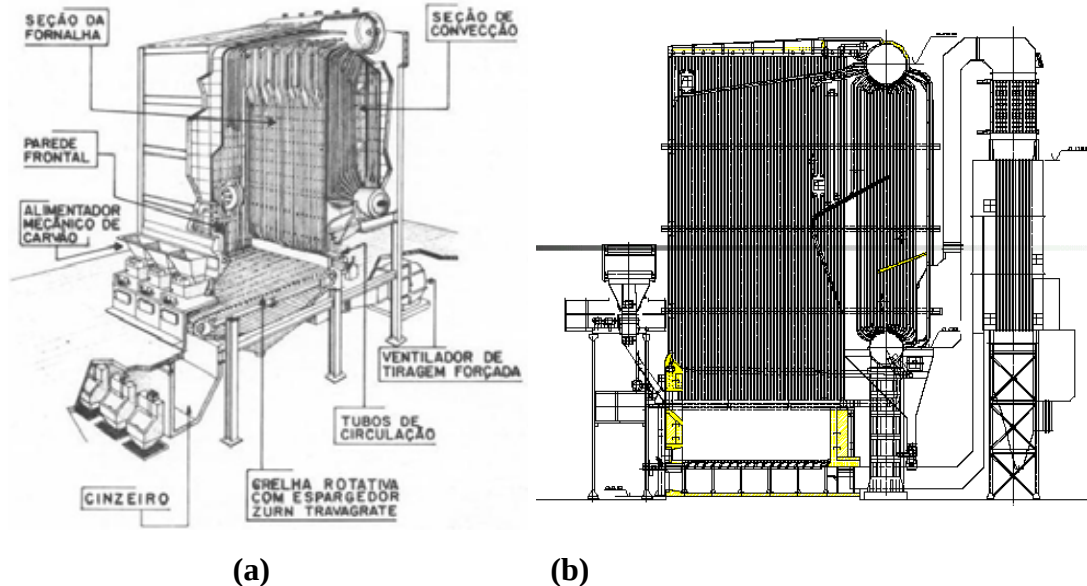


Figura 6: Caldeira aquatubular : (a) Perspectiva; (b) Lateral (ANDRADE,2012)

2.1.4 Desmineralizadores e abrandadores

O uso de água desmineralizada ou abrandada tem a função de remoção de dureza da água que entra na caldeira, impedindo a formação de incrustações internas nos tubos, principalmente por cálcio e magnésio. Na figura 7 temos um desmineralizador com os dois vasos de troca iônica.

Na caldeira à medida que a água ferve e deixa o tambor de vapor como água pura, todos os sólidos dissolvidos ou suspensos permanecem na caldeira. O processo conhecido como ciclagem descreve o acúmulo ou concentração de sólidos na água da caldeira com a formação de vapor. Eventualmente, o conteúdo de sólidos alcançará o limite de saturação dos contaminantes, que precipitam na água da caldeira e eventualmente causam a formação de depósitos. A remoção efetiva ou descarga dos sólidos é o procedimento recomendado para minimizar os depósitos e prevenir que outros problemas se desenvolvam. Uma descarga contínua do tambor de vapor, onde existe a maior concentração de sólidos, controla os ciclos de concentração na água da caldeira.

Abrandamento

- ◆ Consiste na remoção de Ca^{2+} e Mg^{2+} da água. Faz uso de resinas que trocam íons sódio (Na^+) ou hidrogênio (H^+). Após saturação do leito, a regeneração é feita com NaCl ou HCl (as vezes H_2SO_4).

Desmineralização

- ◆ Processo completo, removendo íons positivos e negativos da água deixando-a praticamente isenta de materiais dissolvidos. Consiste em fazer a água passar por um abrandador operando com resina de ciclo H^+ e, após, passar por um leito de resina aniônica, que troca íons OH^- . Este procedimento remove sílica e silicatos solúveis, além de carbonatos, sulfatos e cloretos. Após saturação do leito, normalmente é feita regeneração com soda cáustica (NaOH) (PINTO,2012).



Figura 7: Tanques de troca iônica, desmineralização (ENGENHARIA DE PROCESSO,2012).

2.1.5 Desgaseificador

O principal objetivo do uso do desgaseificador ou desaerador é remover os gases dissolvidos na água de alimentação que causam corrosão nos tubos internos da caldeira, devido à presença de O_2 e CO_2 dissolvidos.

Através do pré-aquecimento da água que alimenta a caldeira é possível aumentar a eficiência térmica, mas em alguns modelos o consumo de vapor para o aquecimento da água chega a 20% da capacidade total da caldeira, mesmo assim ainda é viável energeticamente.

Os desgaseificadores são utilizados para a remoção de oxigênio dissolvido da água evitando a corrosão nas tubulações internas da caldeira e pré-aquecer a água, usado em muitas instalações onde se pretende reduzir o uso de produtos químicos e melhorar a eficiência.

O oxigênio acelera a corrosão e forma corrosão na forma de “Pitting”, o dióxido de carbono forma o ácido carbônico em sistemas de condensado e causa profundos entalhes ou sulcos na tubulação do condensado.

Utiliza-se o vapor como gás depurador porque está disponível na saída da caldeira, aquece a água de alimentação e reduz a solubilidade do oxigênio dissolvido, não contamina a água e tem uma pressão parcial de oxigênio dissolvido ou dióxido de carbono insignificante, permitindo que esses gases sejam retirados da água. Apenas uma pequena quantidade de vapor precisa ser ventilada, pois a maior parte do vapor utilizado para limpar a água é condensada, tornando-se uma parte da água desaerada.

Na figura 8 temos um desaerador com vapor superaquecido, onde o vapor é misturado com a água desmineralizada da entrada reduzindo a solubilidade do oxigênio dissolvido. Os gases liberados são descartados pela válvula superior e liberados para atmosfera.

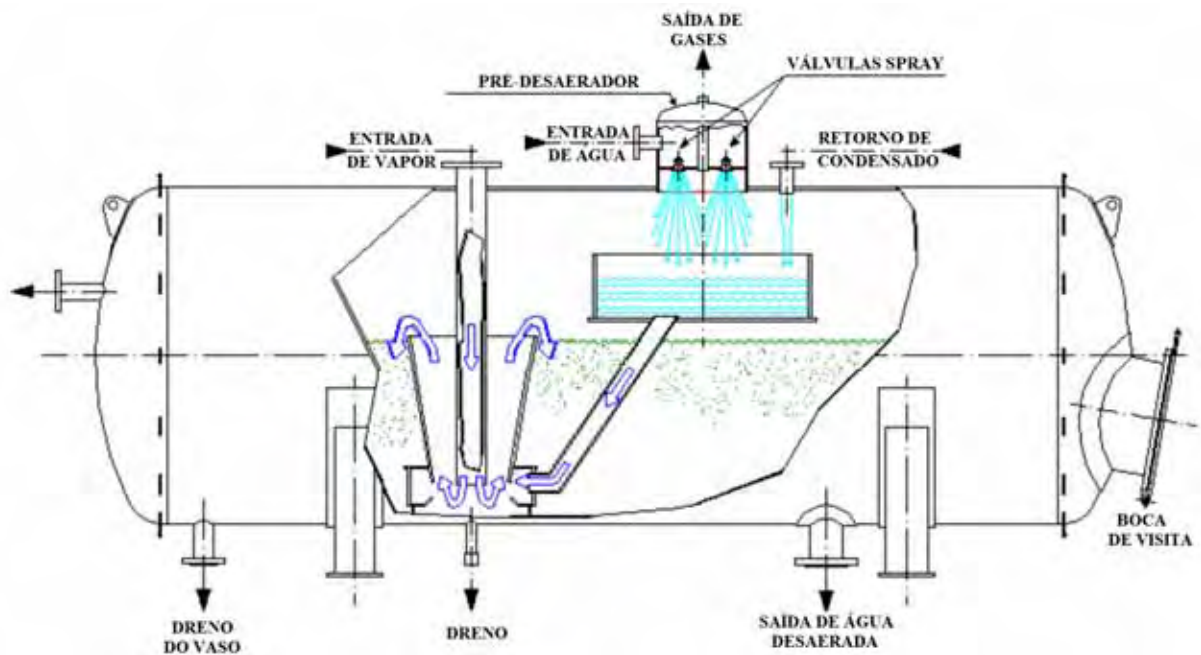


Figura 8. Tanque de desaeração (AQUAFIL,2013).

O tanque de desgaseificação é um equipamento crítico de segurança, porque é um vaso sob pressão NR13 e o controle do nível de água em seu interior precisa ser muito bem controlado, tal como sua pressão interna e as válvulas de segurança.

A falta de água no desgaseificador pode causar por consequência falta de água na caldeira e essa vir a explodir, no caso das proteções de nível não funcionarem.

2.2 Bombas de vácuo

As bombas de vácuo existem desde 1910 conforme HARRIS,2005, dentre as várias tecnologias tem-se ejetores a vapor, anel líquido, híbridos, rotativas e bombas secas, cada qual dimensionadas e projetadas para a aplicação a que se destina, respeitando a limitação de cada tecnologia.

2.2.1 Aplicação do sistema de vácuo na siderurgia.

O sistema em estudo está ligado com a fabricação de aço líquido utilizado na produção de aço de construção mecânica conforme figura 9, com baixo teor de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, elementos químicos que não se combinam com os outros elementos da composição do aço e que causam fragilidade na estrutura cristalina do aço.

Esse processo é vastamente utilizado em industriais siderúrgicas integradas e semi-integradas durante o processo de refino e acerto de ligas no Forno Panela, onde são removidos os gases livres indesejáveis.

Na figura 9 detalha-se o processo de fabricação de aço de construção mecânica de uma Siderúrgica integrada onde a matéria prima principal é o minério de ferro e carvão,

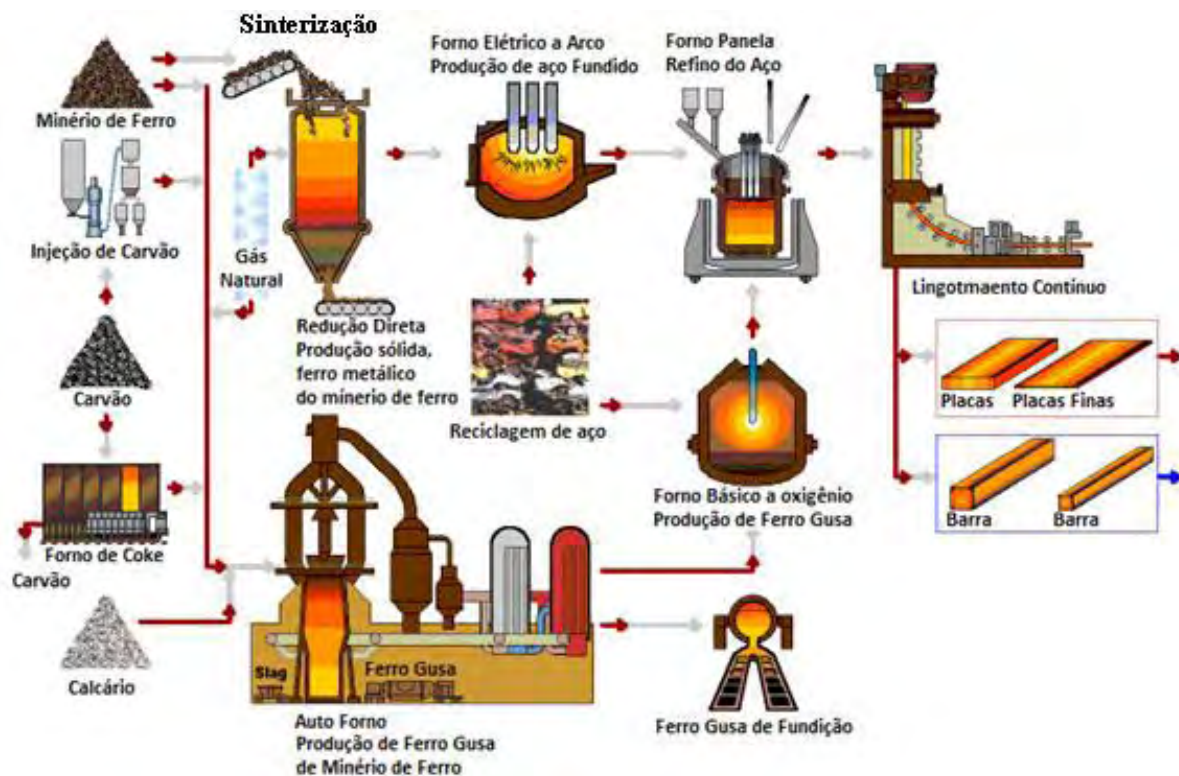


Figura 9: Processo de fabricação do aço (EDWARDS,2012a)

O carvão é utilizado principalmente no processo de coqueificação que ocorre a uma temperatura de 1300°C em ausência de ar durante um período de 18 horas, onde ocorre a liberação de substâncias voláteis. O produto resultante desta etapa, o coque, é um material poroso com elevada resistência mecânica, alto ponto de fusão e grande quantidade de carbono. O coque, nas especificações físicas e químicas requeridas, são encaminhados ao alto-forno e os finos de coque são enviados à sinterização e à aciaria. O coque é a matéria prima mais importante na composição do custo de um alto-forno (60%).

No forno de sinterização a preparação do minério de ferro é feita cuidando-se da granulometria, onde os grãos mais finos são indesejáveis, pois diminuem a permeabilidade do ar na combustão comprometendo a queima, para solucionar o problema adicionam-se materiais fundentes (calcário, areia de sílica ou o próprio sinter¹) aos grãos mais finos.

Com a composição correta, estes elementos são levados ao forno onde a mistura é fundida. Em seguida, o material resultante é resfriado e britado até atingir a granulometria desejada (diâmetro médio de 5 mm). O produto final deste processo é denominado de sinter¹.

Alto Forno é parte do processo de fabricação do aço que consiste na redução do minério de ferro utilizando o coque metalúrgico e outros fundentes que misturados com o minério de ferro são transformados em ferro gusa. Após a reação o ferro gusa na forma líquida é transportado nos carros-torpedos (vagões revestidos com elemento refratário) para uma estação de dessulfuração, onde são reduzidos os teores de enxofre a níveis aceitáveis.

Também são feitas análises da composição química da liga (carbono, silício, manganês, fósforo, enxofre) e a seguir o carro torpedo transporta o ferro gusa para a aciaria, onde será transformado em aço.

Na aciaria, o ferro gusa é transformado em aço através da injeção de oxigênio puro sob pressão no banho de gusa líquido (BOF), dentro de um conversor e nesta etapa pode ser adicionado sucata metálica. A reação, constitui na redução da gusa através da combinação dos elementos de liga existentes (silício, manganês) com o oxigênio soprado, o que provoca uma grande elevação na temperatura, atingindo aproximadamente 1700°C.

O aço proveniente do Forno Básico de Oxigênio (BOF) e do Forno Elétrico a Arco (FEA) são transferido para o Forno Panela onde é realizado ajustes finos na composição do aço e feito a extração dos gases (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio) pelo processo de degaseificação a vácuo.

¹ Sinter produto final do processo de sinterização em indústria siderúrgica.

A seguir o aço é enviado para o processo de lingotamento contínuo o aço líquido é transferido para moldes onde se solidificará. O veio metálico é continuamente extraído por rolos e após resfriado, é transformado em placas rústicas através do corte com maçarico.

Para a realização de vácuo no processo de degaseificação do aço no forno panela são utilizados ejetores à vapor potencializados com a injeção de água resfriada condensando o vapor e aumentando o arraste, ação necessária devido ao grande volume de ar e gases a serem removidos e ao tempo máximo para a obtenção de vácuo abaixo de 133 Pa (1,33 mbar).

Na figura 10 é possível ver os tipos de bombas de vácuo empregadas para cada faixas de vácuo (HARRIS,2005).

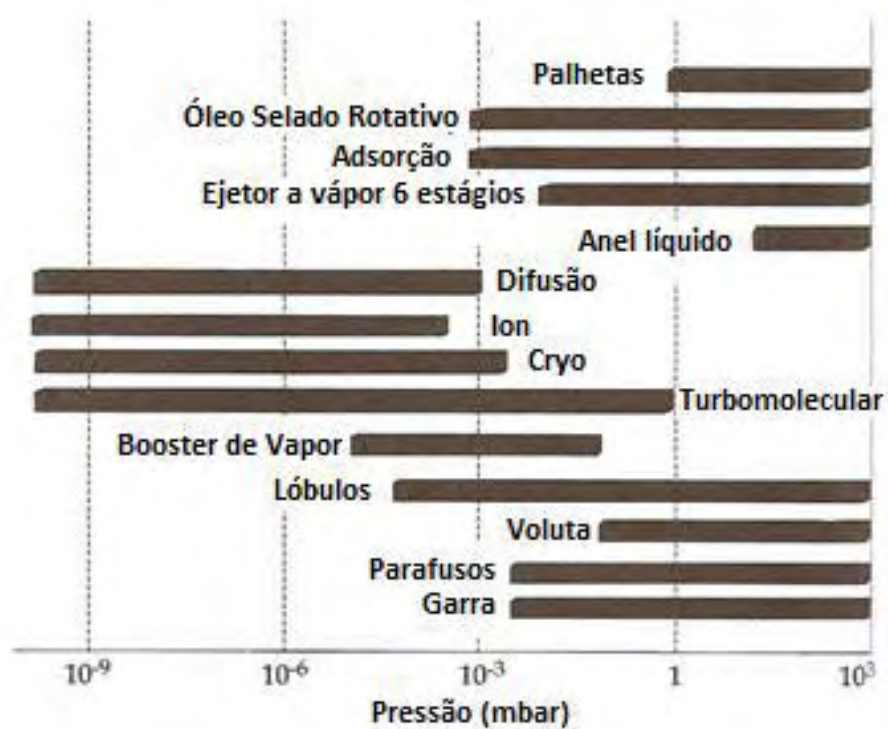


Figura 10: Faixa de operação dos tipos de bombas de vácuo (HARRIS,2005).

Para vácuos de 38 Pa (0,38 torr) (0,51 mbar) e com as características de durabilidade, robustez, geração de efluentes e capacidade de vácuo, o tipo de bomba indicado é o ejedor a vapor de 6 estágios.

As bombas mecânicas com selo de água podem ser usadas em conjunto com as bombas de injetor de vapor para auxiliar a obtenção dos vácuos menores.

As bombas com ejedor a vapor e bombas mecânicas usam água em seu funcionamento, implicando em um efluente contaminado que tem um custo alto para ser tratado.

2.2.1.1 Aplicação em sistemas VD

Sistema VD (*Vácuum Degassing*) é a realização de vácuo em Forno Panela onde é colocada a panela de transporte dentro do recipiente do Forno, e neste mesmo local é realizada a fundição do aço e a desgaseificação, retirando os gases livres, conforme ilustrado na figura 11, com vácuos de até 67 Pa(0,67 mbar) (BRUCE, CHEETHAM, V. LEGGE,2003).



Figura 11: Processo de desgaseificação VD (Edwards, 2012a).

Na fabricação do aço é necessário à injeção de argônio ou nitrogênio no fundo da panela, promovendo a agitação e homogeneização do aço após a adição das ligas no Forno Panela e durante a realização do vácuo, o nitrogênio é utilizado somente quando o aço é Nitrogenado.

Para a produção de aço de alta qualidade devem ser respeitados os limites:

- . H reduzido a ≤ 1 ppm
- . N reduzido a ≤ 20 ppm
- . O reduzido a ≤ 15 ppm

2.2.1.2 Aplicação em sistemas VOD

Sistema VOD (*Vacuum oxygen decarburising*) é a realização de vácuo em tanque que permite a injeção de oxigênio para a redução do teor de carbono, através da combinação do oxigênio injetado com o carbono do aço.

Esse processo é utilizado na fabricação de aço inoxidável, conforme ilustrado na figura 12, com vácuos até 8-20 kPa (80-200 mbar) (BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G.,2003), utilizado para a fabricação de aço inoxidável.

No sistema VOD também deve ser injetado argônio ou nitrogênio durante a realização do vácuo provocando a homogeneização do aço.

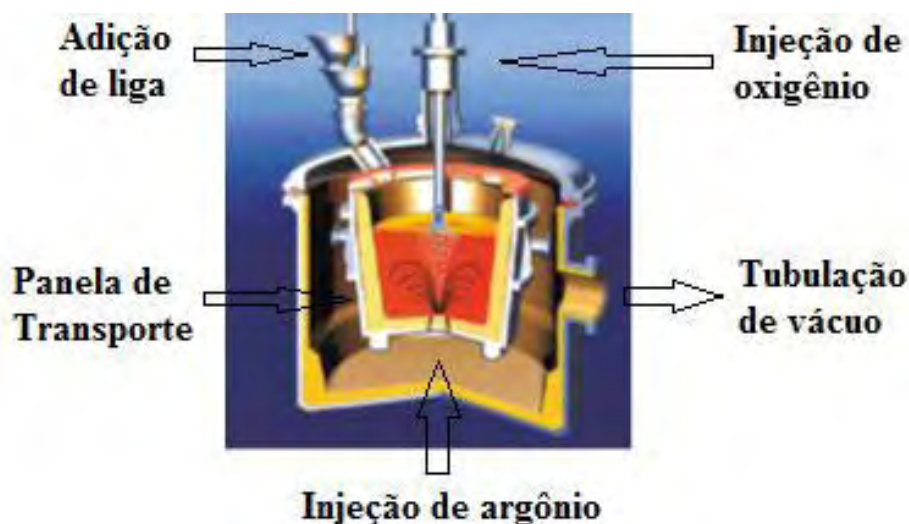


Figura 12: Processo de desgaseificação VOD (Edwards, 2012a).

2.2.2 Bombas de vácuo com ejetores a vapor

A bomba de vácuo com ejetores a vapor é muito difundida no ramo siderúrgico para a limpeza do metal líquido.

De acordo com a HEI (Heat Exchange Institute, 2012) "O princípio de funcionamento de um estágio ejetor de vapor é a conversão da pressão do vapor em energia motriz no bocal, e o jato de alta velocidade de vapor arrasta o gás a ser bombeado. A mistura resultante do gás bombeado com o vapor em alta velocidade que entra no difusor onde esta energia é convertida em pressão de modo que a pressão na descarga do ejetor é substancialmente maior que a pressão na câmara de sucção."

Conforme a figura 13 um ejedor a vapor típico consiste basicamente de um corpo com uma porta de sucção, um tubo difusor em forma de venturi e uma porta de descarga. Também está incluído um bocal geralmente do tipo convergente divergente, através da qual o vapor é admitido para dentro da porção do corpo referida como câmara de sucção.

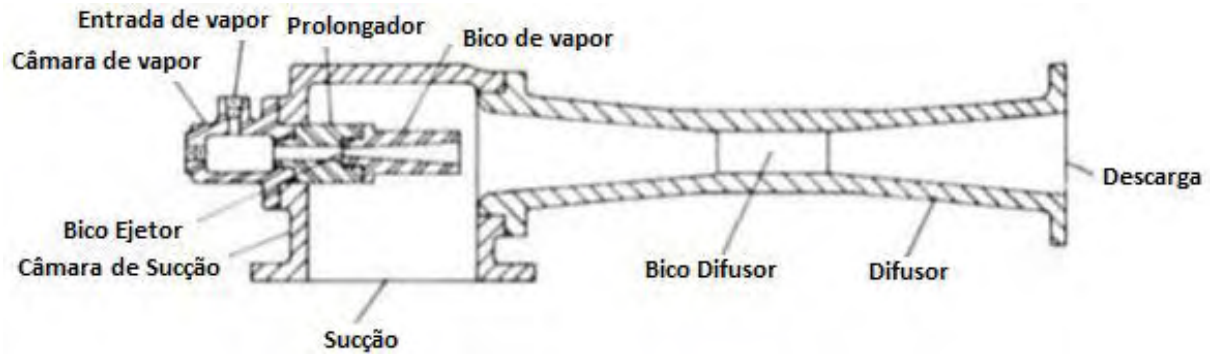


Figura 13: Montagem típica de um ejedor a vapor (HEI, 2012).

O sistema composto por bombas ejedoras de vapor podem operar individualmente ou em conjuntos em série, que permite atingir pressões menores, e uma capacidade maior de arraste.

A capacidade operacional de um ejedor é fixada por suas dimensões e tem limites práticos sobre a compressão total e taxa de transferência que pode ser atingida. A razão entre a pressão absoluta na porta de descarga dividida pela pressão absoluta na porta de sucção é referida como a taxa de compressão. A razão é afetada pela pressão do vapor motriz que é usado para operar o ejedor.

Na figura 14 observam-se graficamente as alterações das pressões dentro do ejedor a vapor (GEA Wiegand GmbH, 2012a).

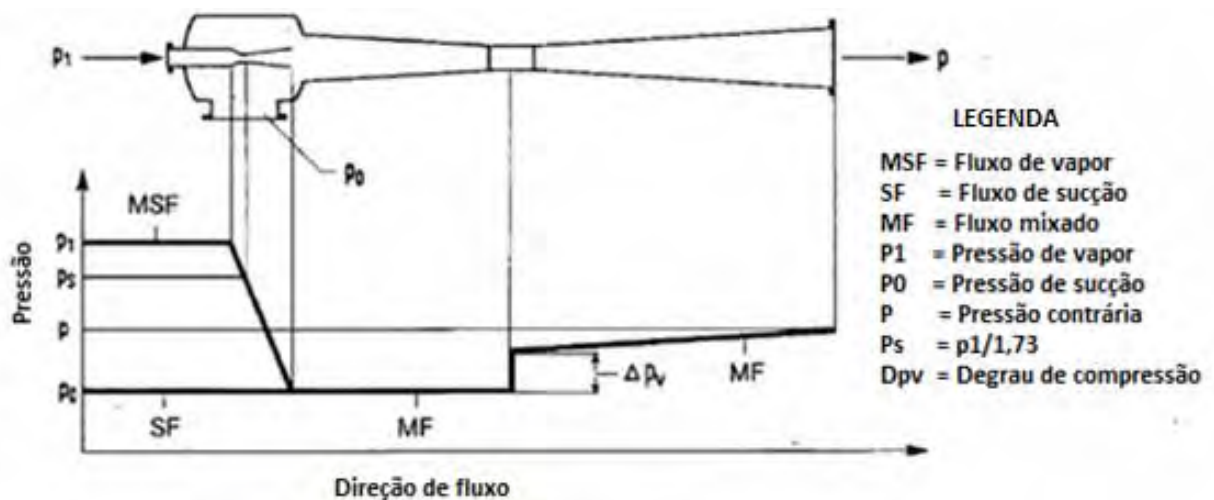


Figura 14: Gráfico de Pressão no ejedor a vapor (GEA Wiegand GmbH, 2012a).

O sistema com ejetores permitem várias montagem buscando atingir o resultado esperado, quando se coloca ejetores em série pode-se obter uma maior compressão e se forem colocados em paralelo para uma maior capacidade de arraste, que também é diretamente relacionada com o tamanho físico do difusor.

Os ejetores a vapor são utilizados em conjunto com intercondensadores ou pós condensadores com a finalidade de condensação do vapor em toda a sua totalidade, reduzindo a quantidade de gás a ser comprimido pela fase seguinte sucessivamente.

Os volumes de vapor e água utilizados nesse tipo de equipamento são grandes e para isso devem ser previsto drenagem e tratamento deste efluente, o vapor deve ser superaquecido para evitar a condensação com a elevação da pressão, necessária para provocar o arraste nos ejetores (Heat Exchange Institute,2012).

O dimensionamento de um sistema de ejedor de vapor deve levar em consideração vários aspectos construtivos, tais como: comprimento das tubulações, entrada de ar falso, saturação do vapor, drenagem do condensado em pontos baixos da tubulação, válvulas que permitam inserir e retirar do circuito os vários estágios de ejetores, controle de nível e fluxo de água nos condensadores, dimensionamento das tubulações para suportar a vazão do gás, esforços dinâmicos nas tubulações para operar com vácuo (Heat Exchange Institute, 2012).

Para algumas aplicações faz-se necessário o uso de um ciclone para retirar os particulados que são aspirados, evitando que estes se acumulem dentro dos ejetores ou vão em excesso para dentro dos condensadores, provocando obstrução e contaminação da água.

O tamanho dos ejetores é inversamente proporcional à pressão do vapor, quanto maior a pressão, menor o tamanho dos ejetores e consequentemente maior a probabilidade de incrustação nas paredes dos ejetores (Heat Exchange Institute,2012).

A concepção de um sistema depende da exatidão das informações que são fornecidas, é necessário que as condições de operação, sucção, fluxo de massa e propriedades físicas sejam fornecidas corretamente.

O tempo de evacuação às vezes é uma questão importante, que precisa ser considerada, em alguns casos deve-se utilizar ejedor de grande capacidade instalado em paralelo, pode ser especificação para atingir um nível de vácuo em um curto período de tempo, utiliza grande quantidade de vapor e move um grande volume de ar.

Conforme *Heat Exchange Institute* a operação e manutenção dos ejetores a vapor têm duas principais preocupações que são a estanqueidade e limpeza, os tubos dos condensadores devem ser inspecionados aproximadamente a cada 6 meses e limpos sempre que necessários, os filtros de vapor, bocais ejetores a vapor e difusores.

As válvulas e tubulações de vácuo devem ser examinadas e testadas regularmente para evitar a entrada de ar falso, que compromete em muito a eficiência do sistema.

O sistema de vapor deve ser um processo contínuo para permitir um fornecimento mínimo de vapor pela caldeira, evitando a variação térmica desta e o resfriamento do vapor na tubulação que vai da caldeira até o bico ejetores, o que provocaria a condensação do vapor, o ejetor pode trabalhar com 2 ou 3% de umidade no vapor, mais que isso, requerem pressões superiores em sua concepção (Heat Exchange Institute, 2012).

O mau funcionamento de um sistema ejetor como qualquer outra peça do equipamento da planta pode ser atribuída às influências externas, bem como internas. Determinar a causa do problema deve ser feito pelo pessoal qualificado, utilizando técnicas apropriadas e equipamentos de teste.

As mudanças externas podem ser mudanças nas condições de serviço que exigem mais demanda sobre o ejetor de abastecimento de água de resfriamento do condensador ou aumento da temperatura média da água de resfriamento especialmente durante o verão, outro ponto muito frequente é à entrada de ar falso ou vazamento dentro do sistema.

Mudanças das condições de fornecimento de vapor, devido a linhas de vapor mal isoladas, com purgadores de vapor mal dimensionados ou até mesmo inoperantes.

A qualidade do vapor é o item de maior impacto no desempenho do ejetor, vapor molhado maior que 3% de água provocam o desgaste dos componentes alterando as dimensões críticas dos bicos. (Heat Exchange Institute, 2012).

Toda pesquisa de problemas é um processo que deve ser feito passo a passo a fim de avaliar cada componente, obtendo a eficiência de cada estágio.

No teste isolado de cada estágio deve-se obter o valor de vácuo correspondente, se não obter deve ser feito uma inspeção naquele estágio para se detectar a causa da baixa eficiência (Heat Exchange Institute, 2012).

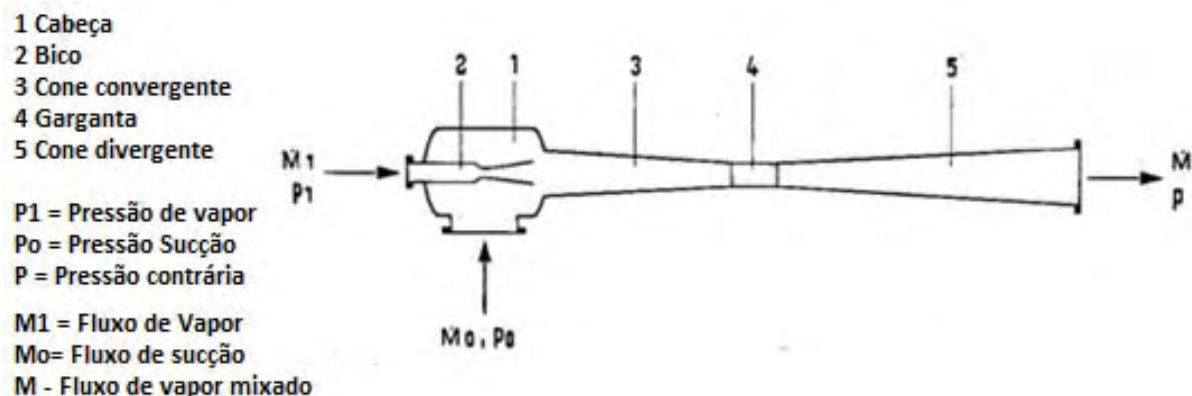


Figura 15: Bomba ejetora a vapor (GEA Wiegand GmbH, 2012b).

Tem-se na figura 16 alguns exemplos de ejtores a vapor, utilizados para grandes capacidades de vazão e geração de vácuo.



Figura 16: Fotos dos ejtores fabricados pela Edwards, 2012c.

Para obtenção de vácuos menores é empregado o uso de vários ejtores em série com várias capacidades de vazão e nível final de vácuo, dependendo de sua aplicação e curva de obtenção do vácuo, conforme figura 17 (HARRIS, 2005).

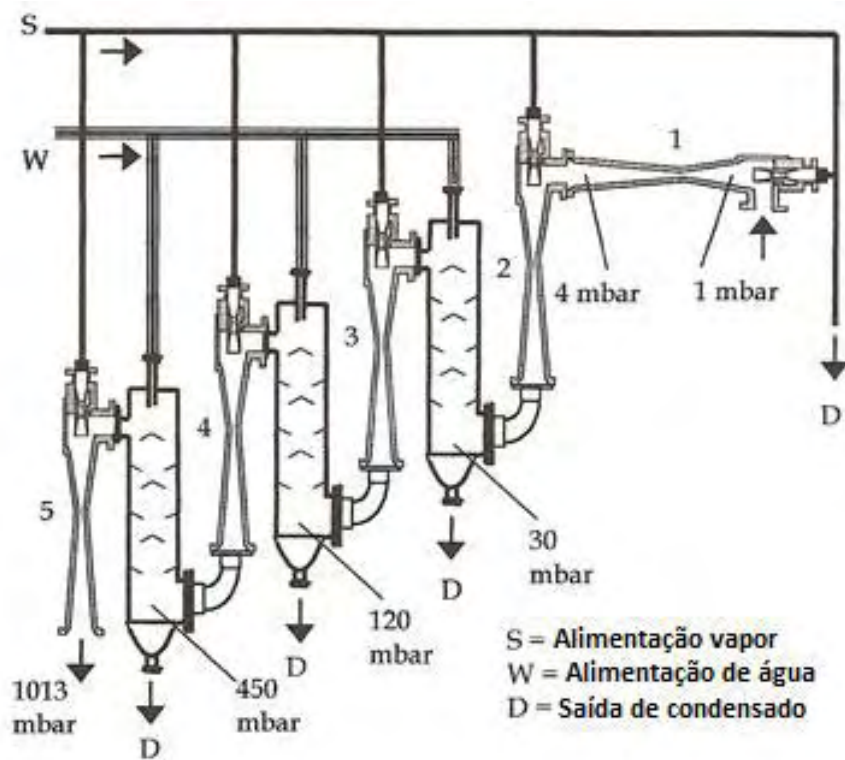


Figura 17: Ejtor a vapor com 5 estágios (HARRIS, 2005).

Na tabela 1 constata-se que a aplicação de vários estágios em série é possível obter vácuos de até 0,7 Pa (0,007 mbar) atendendo uma variedade de aplicações industriais.

Tabela 1: Faixa de operação para sistema multi-estágios

Número de estágios	Faixa de Operação	
	mbar	Pascal
1 ° Estágio	1013 até 100	101 k a 10 k
2 ° Estágio	130 até 13	13 k a 1,3 k
3 ° Estágio	33 até 3	3,3 k a 300
4 ° Estágio	4 até 0,7	400 a 70
5 ° Estágio	0,8 até 0,04	80 a 4
6 ° Estágio	0,05 até 0,007	5 a 0,7

Fonte: (HARRIS, 2005)

No gráfico descrito na figura 18 de acordo com (HARRIS, 2005) pode-se observar um sistema de quatro estágios com a faixa de operação de pressão em (mbar) e vazão (litros/s) que cada um dos estágios pode atingir.

Como os sistemas são em série o resultado de um estágio interfere favoravelmente no segundo e assim consecutivamente, aumentando a velocidade do vapor e proporcionalmente do arraste, obtendo o vácuo esperado.

Os primeiros ejetores são responsáveis pelo arraste do maior volume de ar e por isso atingem valores de vácuo ainda próximos de 101 kPa (1 atmosfera), a medida que vamos para os ejetores posteriores o volume de ar fica menor mas pode atingir vácuos maiores, aproximando do zero absoluto.

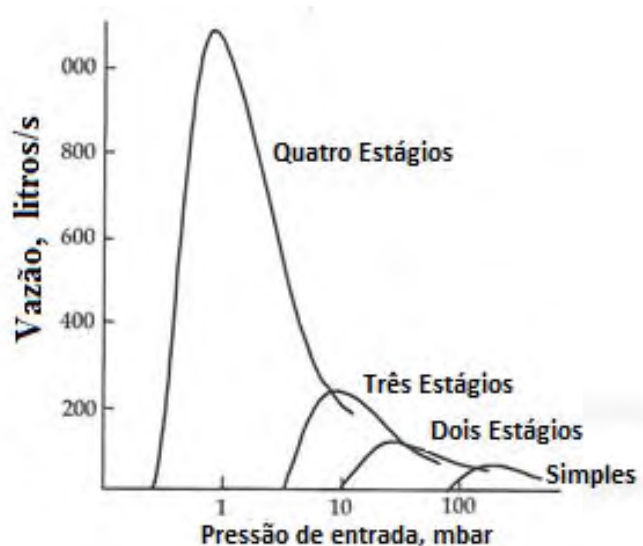


Figura 18: Curva de vazão do ejetor a vapor de múltiplos estágios (HARRIS, 2005).

2.2.3 Sistema combinado de ejetores a vapor com bomba mecânica seca.

Os sistemas combinados visam o aproveitamento das melhores características das tecnologias empregadas, sendo neste caso utilizado as bombas mecânicas de anel líquido para a geração de pré-vácuo, onde temos uma vazão maior e um vácuo baixo deixando os ejetores para o vácuo final onde o vácuo é maior, utilizando esta técnica é possível reduzir o custo de operação de forma significativa.

No sistema demonstrado na figura 19 temos um sistema de vácuo com cinco estágios de ejetores complementados com duas bombas mecânicas com selo de água.

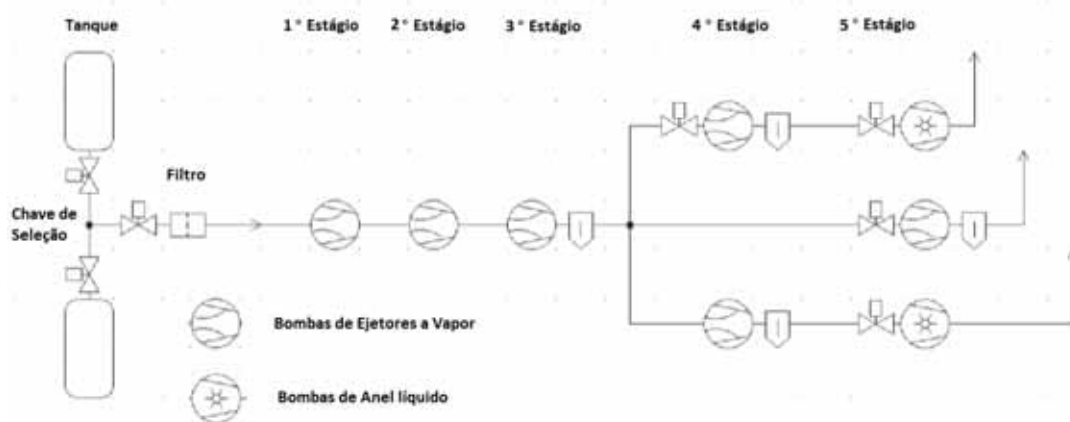


Figura 19: Sistema combinado de ejetores a vapor e bombas de selo de água

Tem-se na figura 20 outro exemplo de um sistema com dois ejetores e uma bomba mecânica de anel de água em um sistema compacto e de montagem modular.

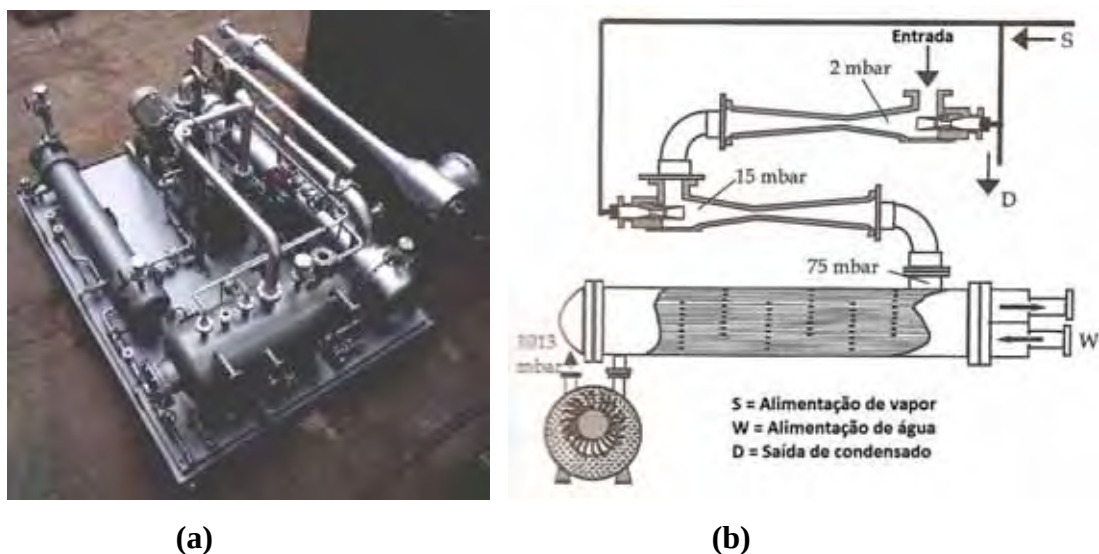


Figura 20: Sistema combinado de ejedor a vapor e Bomba de anel líquido compacto: (a) Instalação Real (Boc Edwards, 2012); (b) Esquemático da montagem (HARRIS,2005).

2.2.4 Bombas de vácuo mecânicas

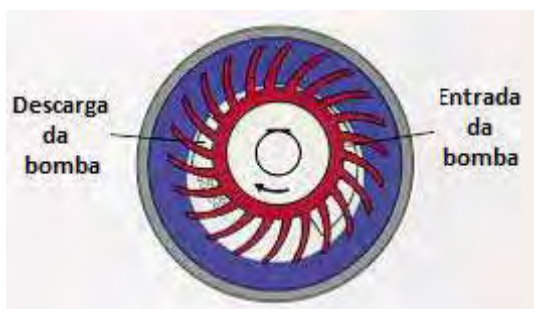
As bombas de vácuo mecânicas são utilizadas há muitos anos, e sua tecnologia tem evoluído constantemente, as primeiras bombas mecânicas a serem utilizadas em indústrias siderúrgicas são as bombas de vácuo com anel líquido.

As bombas de vácuo de anel líquido e roots são utilizadas para a obtenção do pré-vácuo, por obterem maior capacidade de vazão, mas não conseguem atingir o vácuo final necessário para o processo de desgaseificação do aço.

2.2.4.1 Bombas de vácuo com anel líquido

As bombas de anel líquido conforme figura 21 são robustas e confiáveis e não são afetadas pela corrosão e contaminação como ocorre com as bombas de óleo selado, sua operação fácil, oferece flexibilidade e um baixo consumo de energia.

A bomba contém um líquido o qual tradicionalmente é usado água, mas pode ser utilizado outro líquido dependendo da aplicação, sendo uma vantagem porque não há contato de metal com metal entre o rotor e o corpo da bomba.



(a)



(b)

Figura 21: Detalhes construtivos das bombas de anel líquido: (a) Vista frontal; (b) Real

A bomba pode comprimir a pressão atmosférica e com dois estágios pode chegar a 3 kPa (30 mbar) ou ser utilizado para iniciar o vácuo para o sistema de ejetor a vapor. (HARRIS, 2005).

A bomba de anel líquido tem a desvantagem de gerar um efluente contaminado com os gases e particulados que são aspirados.

Na figura 22 tem-se um sistema combinado de bomba de anel líquido com injetor a vapor, fabricado pela NASH uma divisão da empresa Gardner Denver (GARDNER DENVER,2012).

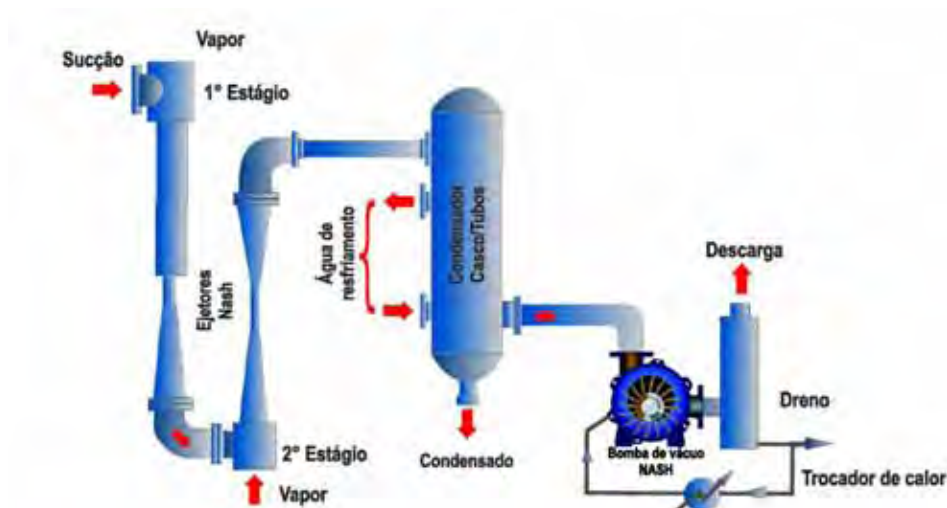


Figura 22: Sistema combinado de ejetores a vapor com bomba de anel líquido fabricado pela empresa Nash (GARDNER DENVER,2012).

Os sistemas de vácuo híbridos são altamente flexíveis, proporcionando a obtenção de elevados níveis de vácuo 133-267 kPa (1-2 mmHg abs) e grandes vazões de gás aspirado. Os sistemas são projetados para as condições específicas de cada processo, visando atender de forma adequada às necessidades do cliente. (GARDNER DENVER, 2012).

2.2.4.2 Bombas de vácuo com lóbulos.

Os sopradores da série **SRT** fabricados pela empresa Omel Bombas e Compressores demonstrado na figura 23 são máquinas volumétricas de deslocamento positivo constituído por um par de lóbulos com perfil conjugado, girando no interior de um corpo adequadamente projetado.

O gás aspirado é comprimido nas pequenas folgas que se formam entre os lóbulos e o corpo, e depois transferido para a descarga. A pressão de funcionamento refere-se à perda de carga gerada pelo gás bombeado na instalação.

A capacidade é proporcional à rotação e praticamente constante com a variação da pressão de funcionamento.

O sentido de rotação nas máquinas tri lobular não pode ser invertido devido às suas particularidades construtivas e o fluxo do gás é sempre de cima para baixo nas máquinas SRTV e da esquerda para a direita nas máquinas SRTH. O sentido de rotação é sempre anti-horário quando visto pelo eixo de acionamento.

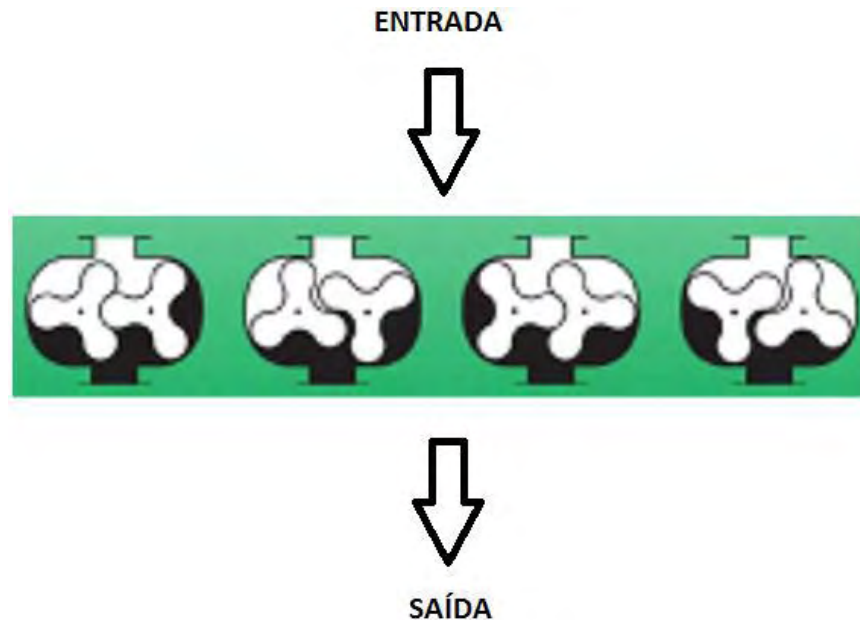


Figura 23: Detalhes funcionais da bomba de lóbulos da Omel (Omel,2012).

As bombas de lóbulos conforme na figura 24 oferecem várias vantagens, como bombear ar ou gás com total isenção de óleo, capacidade constante com o variar da pressão, construção robusta e folgas reduzidas que permitem funcionamento em pressões de até 100 kPa (1 bar) ou vácuos máximos de até 50 kPa (500 mbar), manutenção mínima, economia operacional, durabilidade elevada e flexibilidade de instalação com acoplamento direto.



Figura 24: Bomba de lóbulo, fonte: catálogo Omel (Omel,2012).

2.2.4.3 Bombas de vácuo combinadas entre Roots e anel líquido

Os sistemas combinados proporcionam maior eficiência energética e obtenção de vácuo menor, tem-se na figura 25 um sistema composto por um ciclone com a função de remoção do particulado que está sendo aspirado impedindo que este venha a danificar os internos das bombas, dois estágios de bombas de lóbulos ou comumente chamadas de Roots que proporcionam uma capacidade de vácuo para altas vazões e um terceiro estágio com bomba de anel líquido que tem a função de levar o vácuo do tanque a valores menores, com a desvantagem de gerar um efluente contaminado com os gases e particulados que são aspirados.

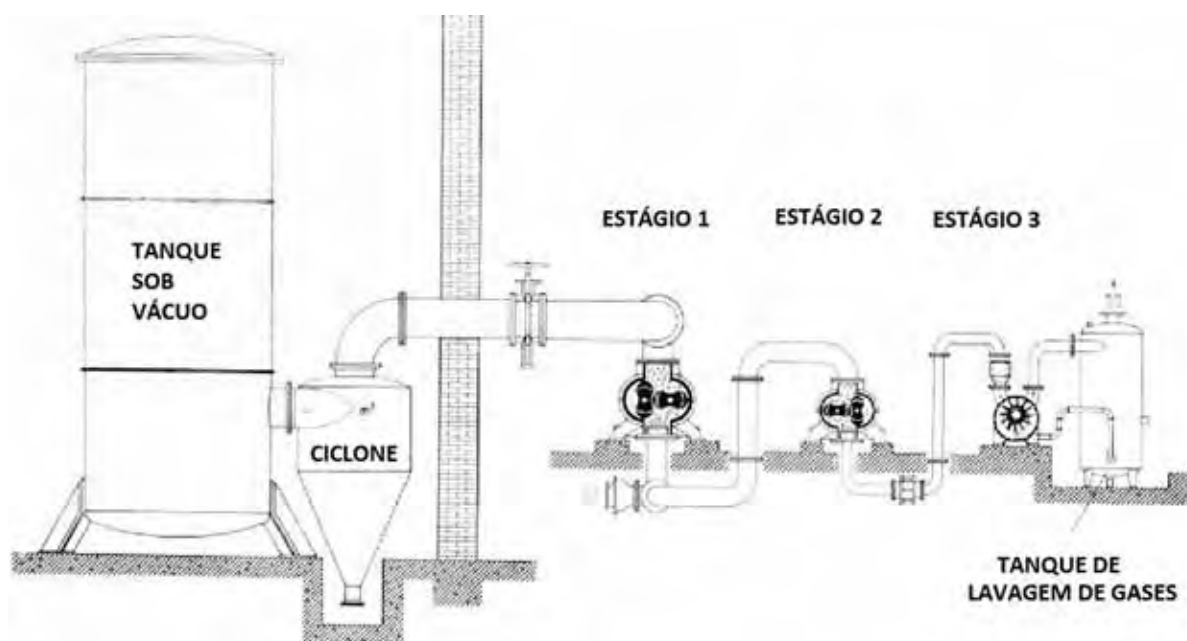


Figura 25: Sistema combinado de bombas de lóbulos com anel líquido (BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G, 2003).

2.2.4.4 Bomba de vácuo mecânica seca.

O mecanismo primário ideal de bombeamento para suportar sistemas a vácuo de desgaseificação de aço é um sistema com bomba mecânica seca no qual a poeira do processo pode ser continuamente aspirada sem causar danos significativos. Existem três grandes tipos de bombas secas que podem ser consideradas: garra, parafuso e lóbulo (BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G, 2003).

Na figura 26 tem-se um sistema de desgaseificação composto por três estágios de bombas secas, no primeiro e segundo estágios por bombas de lóbulos (Roots) e o terceiro por bombas tipo garras.

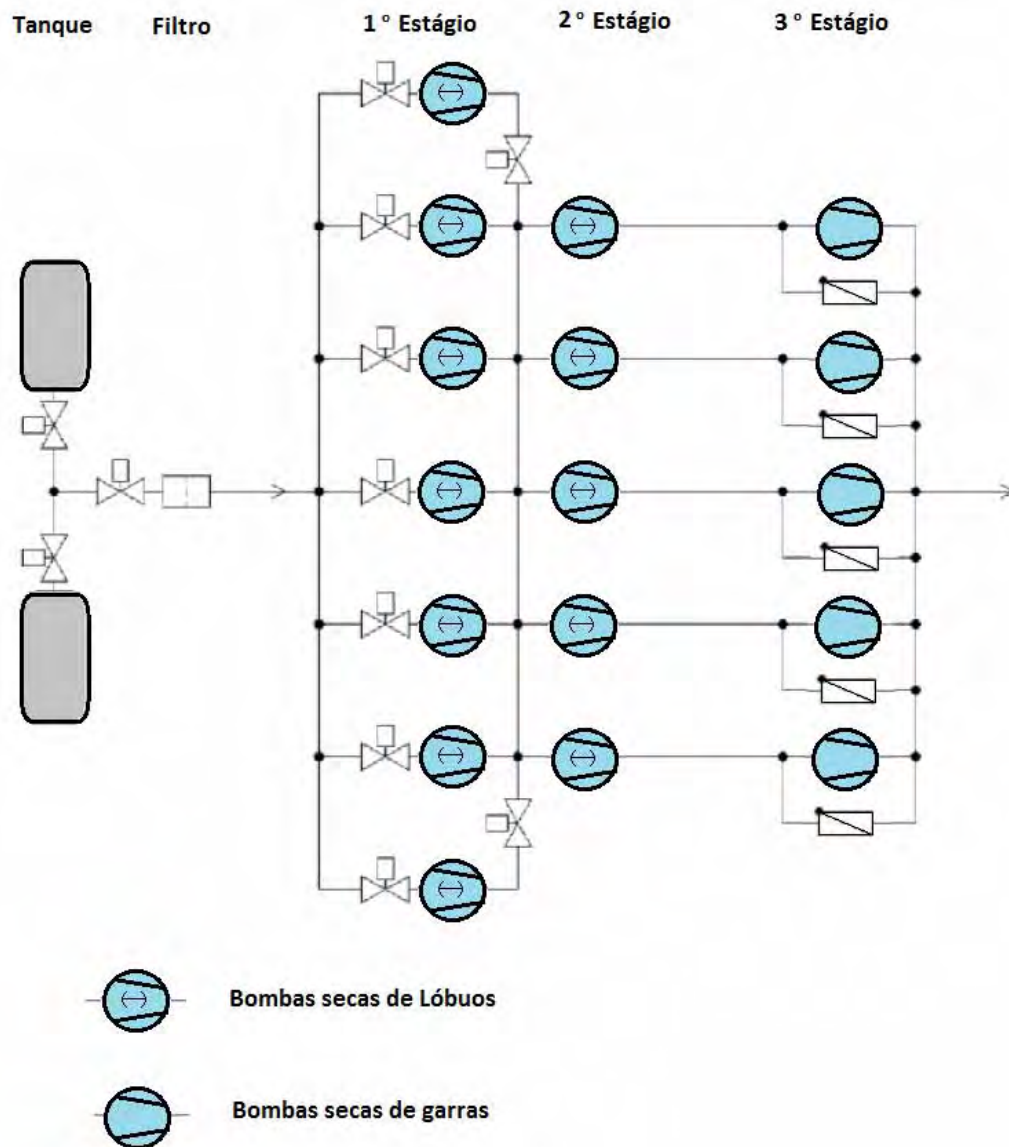


Figura 26: Sistema de desgaseificação com bombas mecânicas

Inicialmente tem-se os tanques onde se deseja realizar o vácuo, que podem ser um, dois ou mais tanques desde que tenham válvulas para manobrar o respectivo Tanque.

Filtro de pó dedicado a filtrar os particulados metálicos e finos que são retirados da aspiração dos tanques, normalmente utiliza-se nesta aplicação um filtro tipo ciclone sob vácuo.

Primeiro e segundo estágios de bombas Booster com alta capacidade de vazão e boa suportabilidade a poeira e finos metálicos, usam a tecnologia de lóbulos (Roots) demonstrado na figura 27.



Figura 27: Bombas de lóbulos (Ewards, 2012a).

Bombas de lóbulos secos são efetivamente Roots de multi-estágio, portanto têm a vantagem de permitir a passagem de muita contaminação. A compressão é conseguida através da paragem (uma bomba típica teria três fases sobre a redução de um eixo comum com intercooler fornecido). A turbulência gerada é ser capaz de lidar com o pó metálico e finos. Muita experiência foi adquirida em processos sujos e corrosivos com estas bombas e a experiência atual em instalações de desgaseificação de aço com cargas de pó médio. Consumo de energia é normalmente mais elevado para as pressões finais mantidos durante o processamento do VD (BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G, 2003).

O terceiro estágio é composto por bombas tipo garras que são compressores verdadeiros e podem transferir o ar aspirado para a atmosfera sem a necessidade de uma refrigeração de escape ou alívio complicada. O rotor sem contato conforme figura 28 são garras cilíndricas na maior parte da circunferência e possui uma depressão profunda seguida por uma garra saliente. Durante a rotação da garra entra na depressão do rotor de forma coincidente e vice versa. O mecanismo de entrada e escape está nas extremidades da unidade em vez de dispostas verticalmente como ocorre com a bomba de lóbulos (HARRIS, 2005).

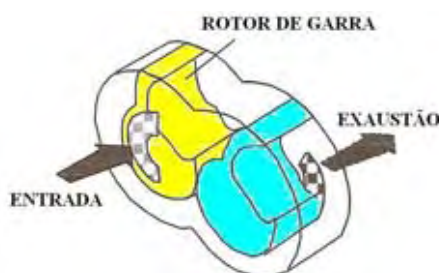


Figura 28: Mecanismo da bomba mecânica de garra.

À medida que os dois rotores giram, o gás é aspirado através de uma ranhura de entrada que corresponde a cavidade de um dos rotores, continuando o movimento de rotação fecha a entrada, enquanto as garras comprimem o volume retido do gás até que a cavidade do segundo rotor expõe a saída de escape, conforme demonstrado na figura 29 (HARRIS, 2005).

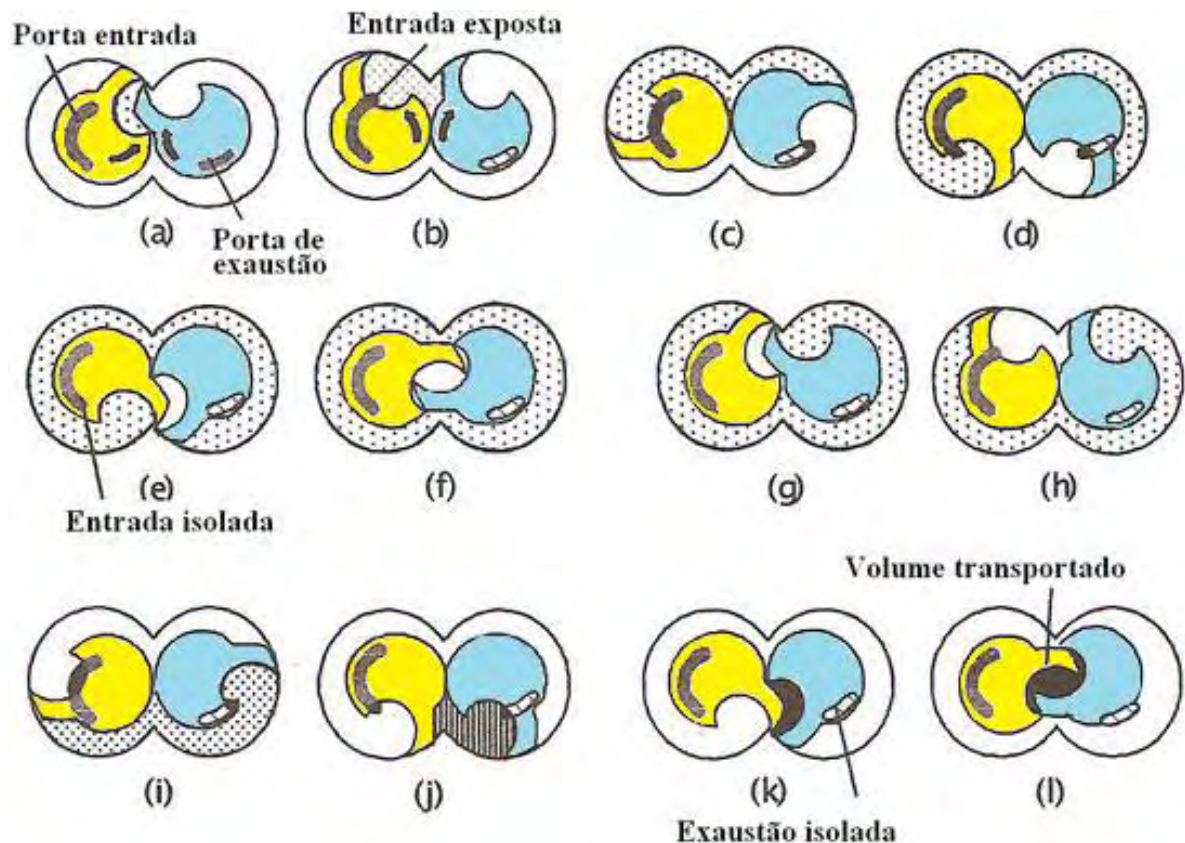


Figura 29: Vários estágios de rotação da bomba de garra. Entrada dos gases posição (a) até (f). Exaustão dos gases posição (g) até (l) (HARRIS, 2005).

As bombas de garra secas têm a vantagem de gerar uma turbulência interna muito elevada, altas temperaturas internas e uma boa compressão no gás de passagem. Isto é ideal para a maioria dos tipos de contaminação potencial, mas é particularmente útil quando se considera a probabilidade de poeiras metálicas e vazamentos que entram no mecanismo (BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G, 2003).

A principal vantagem da configuração de garras é a produção de alta relação de compressão, acima de 50 até 100 Pa. Normalmente obtêm 50:1 próximo de 100 Pa, caindo para cerca de 25:1 quando da exaustão para atmosfera conforme demonstrado na figura 30.

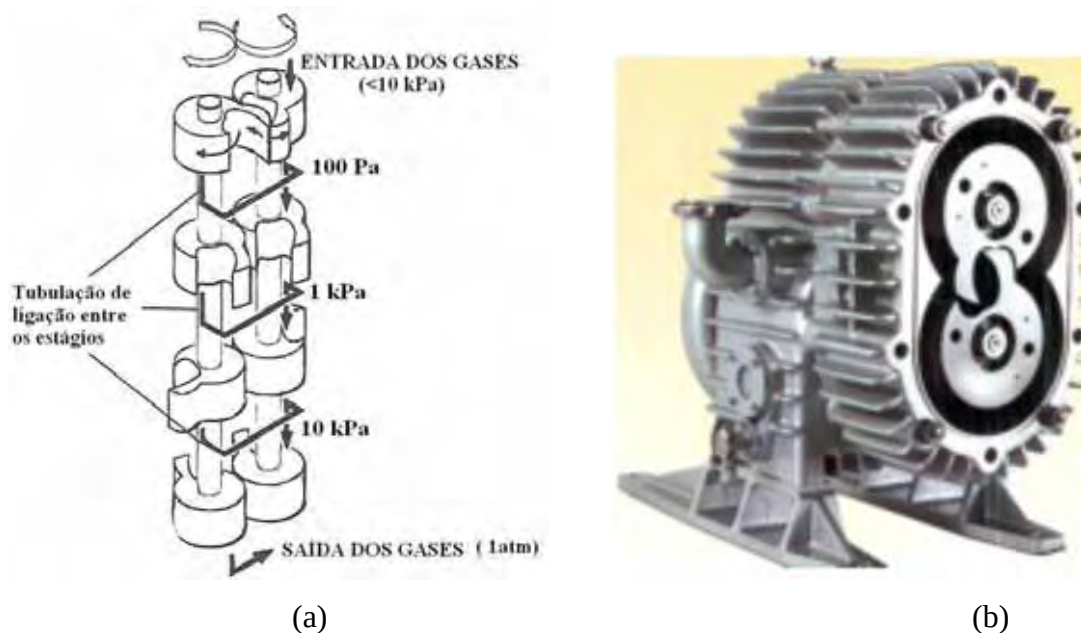


Figura 30: Bomba de vácuo tipo Claw (HARRIS,2005): (a) Funcional; (b) Real

Muita experiência foi adquirida ao longo dos anos com esta tecnologia, não só em metalurgia, mas também em outros processos empoeirados e altamente corrosivos, tais como processamento de semicondutores. Foi alcançada uma boa experiência em instalações de desgaseificação do aço, o que demonstra a simplicidade de operação e uma boa confiabilidade.

O consumo de energia também é relativamente baixo para as pressões finais mantidas durante o processamento do VD.

Em locais onde o carregamento de pó é extremo, um sistema de purga de ar automatizado é útil para proporcionar um rendimento elevado momentânea do ar atmosférico durante a operação normal de conduzir o pó arrastado para fora da bomba. Isto é ilustrado em um processo VD / VOD (BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G, 2003).

Na figura 31 tem-se um desenho ilustrativo de um conjunto de bombas utilizado em metalurgia secundária para desgaseificação de aço, o primeiro estágio é composto por bombas de lóbulo de alta capacidade de vazão de $8,3\text{m}^3/\text{s}$ ($30000\text{ m}^3/\text{h}$), o segundo estágio também é compostos por bombas de lóbulos de $3,89\text{m}^3/\text{s}$ ($14000\text{ m}^3/\text{h}$), e o terceiro por bomba tipo Claw de $0,1\text{ m}^3/\text{s}$ ($400\text{ m}^3/\text{h}$), sendo este último responsável por atingir o vácuo final.

Cada conjunto de bomba é montado com as bombas em série proporcionando uma alta capacidade de vazão e obtenção de um vácuo final baixo.

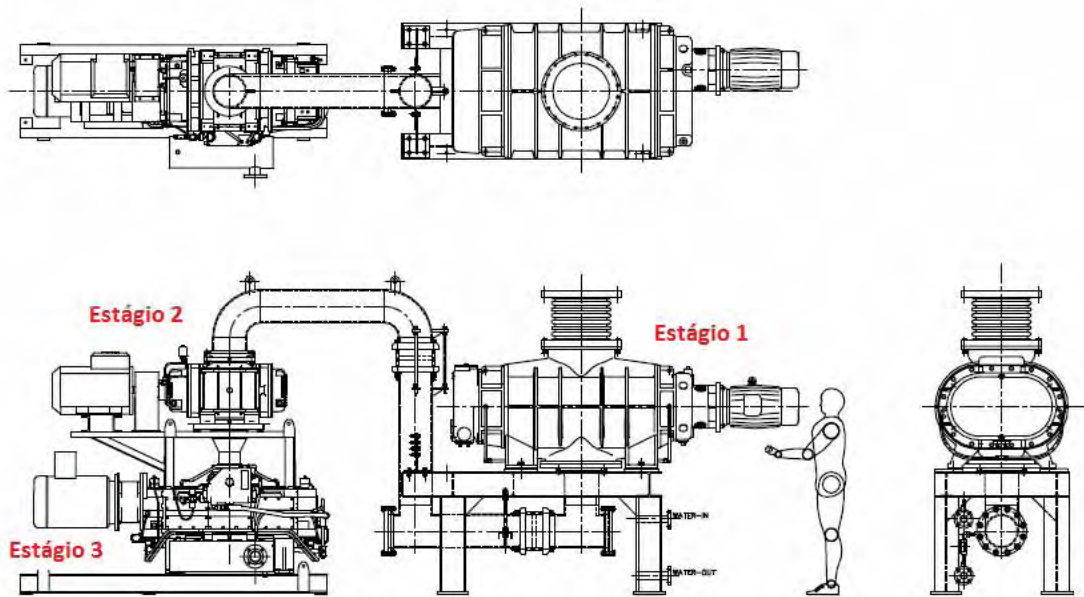


Figura 31: Desenho ilustrativo da montagem mecânica das bombas secas (Edwards, 2012a).

Observa-se na figura 32 que as bombas são relativamente pequenas e favorecem uma montagem simples, comparadas com um sistema com sistemas de bombas ejetoras a vapor.



Figura 32: Instalação das bombas secas em indústrias de aço (Ewards, 2012a).

A capacidade de vazão pode ser aumentada simplesmente aumentando-se os conjuntos bombas de vácuo em função da aplicação.

Na figura 33 observa-se uma montagem modular do sistema de bombas mecânicas secas, para aumentar a capacidade de vazão simplesmente aumentam-se os conjuntos em paralelo, permitindo inclusive a instalação de módulos reservas para disponibilidade dos conjuntos para eventuais manutenções.

A utilização de bombas mecânicas diretamente acopladas em motores elétricos permite a utilização de inversores de frequência possibilitando aumentar ou diminuir a potência de cada conjunto buscando a maior eficiência, em função da curva de decaimento do vácuo.

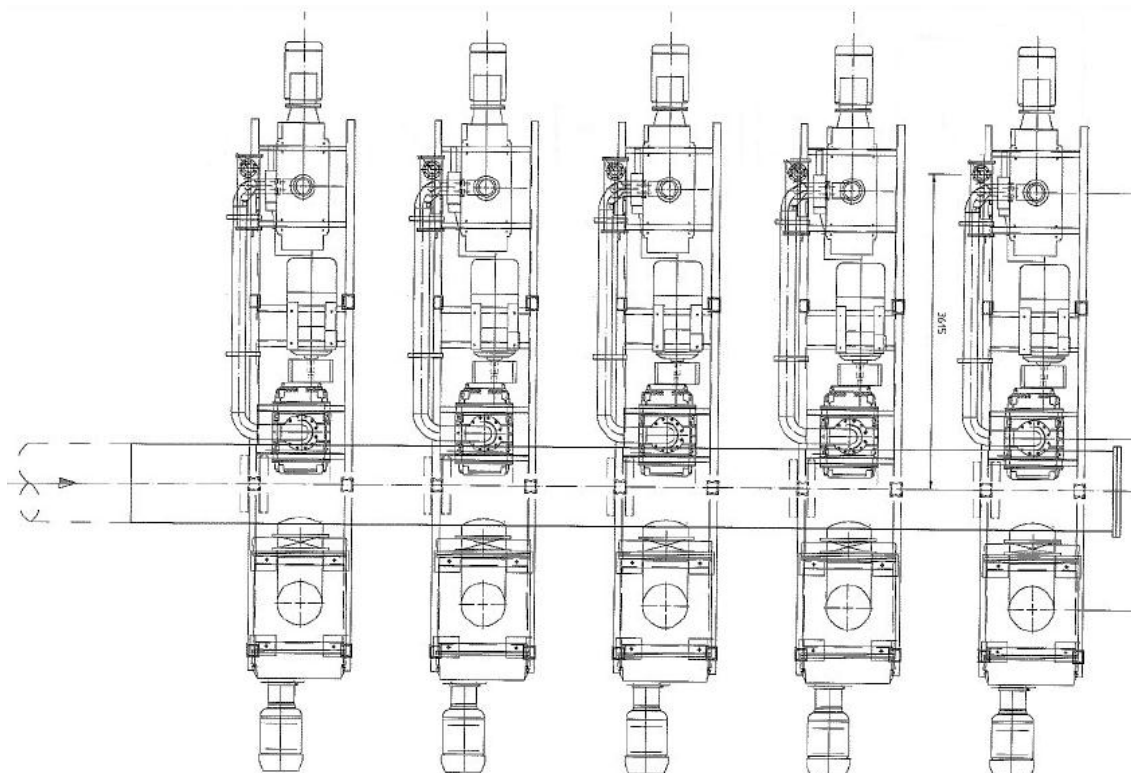


Figura 33: Montagem modular das bombas secas (Edwards, 2012a).

2.2.5 Comparativo das tecnologias de bombas de vácuo

Dentre as várias tecnologias atualmente empregadas sua utilização está vinculada a sua aplicação ou processo, tal como os contaminantes e o tempo para atingir um determinado nível de vácuo, mas de uma forma geral pode-se fazer um comparativo das várias tecnologias considerando suas aplicações usuais.

Segundo Harris, 2005 demonstrado na figura 34 (modificado do J L Ryans and Bays. “Run clean with dry vacuum pumps” Chemical Engineering Progress, 2001) tem-se a comparação das curvas de velocidade de três sistemas, bomba ejetora de três estágios, bomba de lóbulos de dois estágios e uma bomba seca. Observa-se que as bombas secas possuem uma estabilidade de velocidade de arraste regular desde 1 atm até níveis menores que 100 Pa (1mbar).

Demonstra que bombas secas são uma alternativa viável de custo efetivo em relação aos ejetores a vapor e bombas de anel líquido em série (RYANS & BAYS.2001).

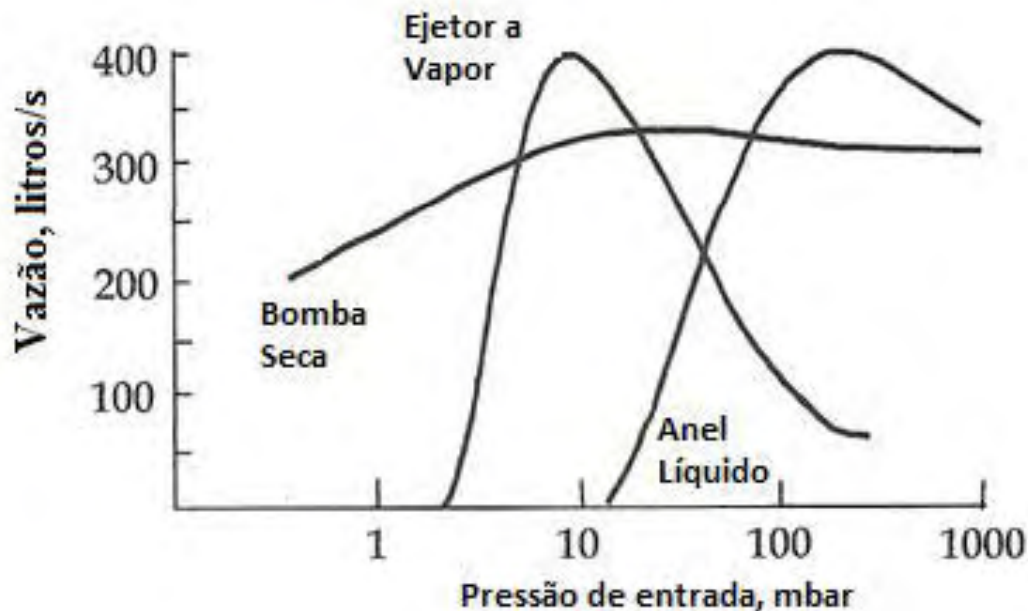


Figura 34: Comparativo das curvas de vazão em litros por segundo de uma unidade de três estágios de ejetores a vapor, dois estágios de bomba de anel líquido e uma bomba seca (HARRIS, 2005).

A evolução das tecnologias visa principalmente a redução dos custos de implantação e operação, menor poluição do meio ambiente com a eliminação da queima de Gás Natural, redução drástica na utilização de água de refrigeração e menor consumo de energia elétrica, todas essas melhorias possibilitam que o produto seja mais competitivo no mundo globalizado.

Na tabela 2 conforme (HARRIS,2005) tem-se um comparativo dos pontos positivos e negativos das várias tecnologias abordadas, demonstrando um histórico cronológico da invenção dessas tecnologias e como elas evoluíram até os dias atuais.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens das tecnologias de bombas de vácuo

Tipo/Invenção	Vantagens	Desvantagens
Ejetores a vapor (1910)	Máquina única sem partes móveis Desempenho amplo Custo competitivo de investimento Bom deslocamento de sólidos e líquidos em suspensão	Produção de condensado contaminado Energéticamente ineficiente Alto custo de instalação Instável em condições de variação do processo Pode ser ruidoso
Anel líquido (1920)	Máquina única Baixo custo de capital Bomba atua como condensador Pode operar com líquidos, pó e partículas sólidas Manutenção simples Pode operar com vapores corrosivos	Consumo de líquido Pode produzir líquido contaminado, problemas de disposição Pode contaminar o processo com o líquido Eficiência do vácuo limitada e cavitação Energéticamente ineficiente Alto custo de instalação Alto custo do patrimônio
Híbridos (Vapor+Anel líquido) (1950)	Máquina única Eficiência do vácuo boa	Consumo de água Poluição e disposição Inflexível Alto custo do patrimônio
Rotativas através com óleo (1970)	Boa eficiência do vácuo Flexível Menor poluição em relação aos ejetores e vapor e anel líquido	Produz óleo contaminado - custo de disposição elevado Máquina complexa requer proteção caras Contaminação de óleo no processo Condensação de produtos no reservatório de óleo Alto custo de manutenção Pior confiabilidade quando partículas ou gotículas estiver presentes
Bombas Secas (1980)	Sem óleo, vapor ou água armazenada Sem poluição Ampla faixa de vácuo Processo limpo Baixo custo para o proprietário Equipamento pequeno	Máquina complexa Relativamente custo de capital alto Intolerância a sólidos Comparativamente baixa capacidade de bombeamento Alta temperatura de operação - pode ser controlada

Fonte: (HARRIS, 2005).

3. ESTUDO DE CASO

3.1 Aspectos gerais

O sistema de geração de vácuo a partir do uso do vapor é uma tecnologia consolidada no mercado, mas frente às tecnologias mais atuais ela é muito onerosa financeiramente como ambientalmente.

3.2 Sistema de produção de vácuo

O processo de obtenção de vácuo atual possui várias etapas de transformação de energia conforme a figura 35, cada uma das etapas tem seus insumos energéticos e suas perdas naturais, diminuindo o rendimento energético do sistema.

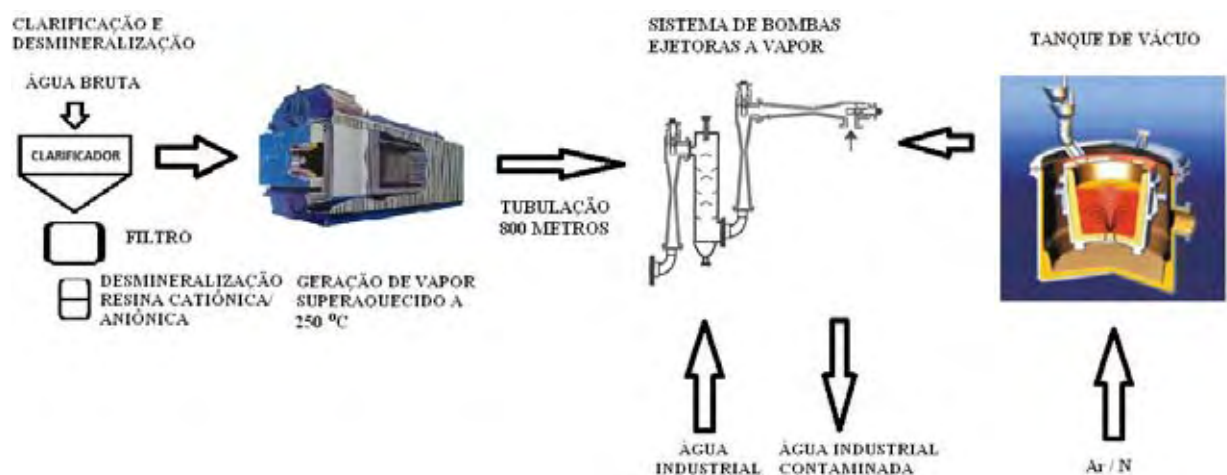


Figura 35: Processo simplificado do sistema em estudo

Podemos separar o processo em:

- 1) Clarificação da água
- 2) Desmineralização
- 3) Geração de vapor
- 4) Transporte do vapor
- 5) Bombas ejetoras a vapor
- 6) Tanques de vácuo
- 7) Tratamento da água industrial

Para a indústria siderúrgica a obtenção do vácuo é um processo oneroso e representa um valor significativo no custo de transformação do produto, o principal insumo do custo de transformação é o Gás Natural utilizado na caldeira.

A operação dos equipamentos demanda uma mão de obra qualificada, horas de treinamento e reciclagem constante, a manutenção é muito cara devido a alta temperatura, equipamentos dedicados e peças fabricadas especialmente para aquela aplicação, por se tratar de caldeira é necessário atender legislação pertinente NR-13 e executar periodicamente as inspeções estruturais dos vasos e da fornalha da caldeira, sendo uma atividade de alto risco e é obrigatório acompanhamento em tempo integral de operadores qualificados.

3.3 Caldeira

A caldeira em estudo, figura 36 está em operação há 32 anos em perfeitas condições de operação, sendo realizada manutenção preventiva e inspeção anualmente.

A partir de 2002 foi convertida de óleo combustível para Gás Natural, implicando na substituição do queimador principal, melhorando sua condição operacional e uma redução da troca térmica por irradiação.



Figura 36: Caldeira abordada no estudo

Os feixes de tubos são organizados conforme demonstrado na figura 37, na parte inferior temos o tanque de água fria, ou água pré-aquecida a 130 °C no Desaerador, no corpo da Caldeira temos o maçarico ou queimador onde é realizada a queima do gás natural, produzindo o calor que será transmitido aos tubos e consecutivamente à água.

O aquecimento dos tubos produz o vapor que é armazenado no tanque superior, por medidas de segurança mantem-se metade do tanque com vapor e metade com água superaquecida.

Após a retirada do vapor do tanque superior este passa por tubos colocados estrategicamente de frente para o maçarico com o objetivo de superaquecer o vapor até 250 °C, devido a essa construção a caldeira não pode parar de fornecer vapor e continuar com o maçarico ligado porque provoca o derretimento dos tubos do super aquecedor.

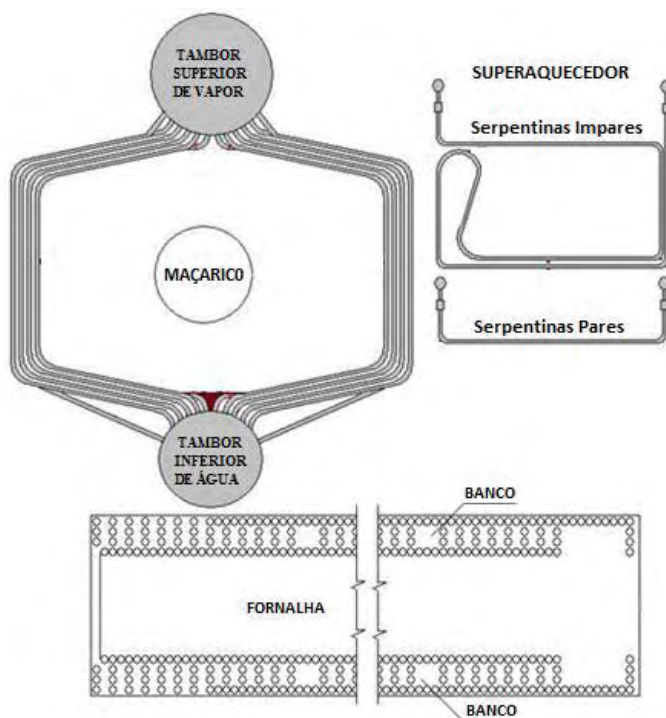


Figura 37: Arranjo da tubulação da Caldeira Dedini

A caldeira considerada neste estudo tem as características construtivas conforme tabela 3, utilizando vapor superaquecido e baixa pressão.

Tabela 3: Dados do Equipamento/ Placa de Identificação

Especificação	Valores Construtivos
Denominação	M. Dedini - Keystone - Tipo 11M
PMTA	2,8 MPa (28 kgf/cm ²)
Pressão de Operação	2,0 MPa (20 kgf/cm ²)
Pressão de Teste Hidrostático	4,1 MPa (42 kgf/cm ²)
Produção de vapor	5 kg/s (18000 kg/h)
Superfície de Aquecimento	341 m ²
Natureza do Vapor	Superaquecido a 250 °C
Combustível	Gás Natural (GNP)
Categoria (NR-13)	“A”

A caldeira opera próximo dos limites projetados, na tabela 4 temos os valores considerando a queima de GNP, após a modificação do combustível no ano de 2002.

Tabela 4: Valores considerados para queima de GNP (10% de Excesso de ar)

Especificação	Valores Construtivos
Produção de Vapor	20455 kg/h
Eficiência (% do INPUT)	80,72 (ao PCI)
Temperatura de saída dos gases	290 °C
Peso dos gases de saída	22981 kg/h
Taxa de liberação superficial da fornalha (PCI)	307364 kcal/m ² .h
Taxa de liberação volumétrica da fornalha (PCS)	725893 kcal/m ³ .h
Absorção superficial da fornalha (PCS)	101013 kcal/m ² .h

Fonte: Manual do fabricante.

Notas: Bases dos valores acima:

- Gás natural da bacia de Campos/RJ
- Temperatura ambiente : 26°C
- Altitude da fábrica : 560 m
- Temperatura da água de alimentação..... : 130 °C
- Pressão de operação : 2,0 MPa (20 kgf/cm²)

3.3.1 Queimador

O queimador é a peça principal de uma caldeira, ele é responsável pela mistura adequada de ar/gás, que garante a queima de 100% do gás e a conversão da energia química em térmica, um queimador mal dimensionado ou de baixa eficiência pode representar um aumento significativo no custo do produto final da empresa.

Na tabela 5 temos as potências máximas do queimador da caldeira, com potência de 15 Gcal/h, esse queimador foi instalado quando da conversão da caldeira de óleo combustível para Gás natural.

Tabela 5: Queimador

EQUIPAMENTO	QUEIMADOR INGENER	POT. UNIT
Caldeira DEDINI A	ECLIPSE THG-15000	63 GJ/h (15 Gcal/h)
Caldeira DEDINI B	ECLIPSE THG-15000	63 GJ/h (15 Gcal/h)

Fonte: Catálogo do fabricante Ingener

A figura 38 demonstra a montagem do queimador, que tem uma disposição dos maçaricos equidistante uns dos outros para favorecer uma distribuição melhor do Gás natural na região de queima e a mistura com o ar de combustão.

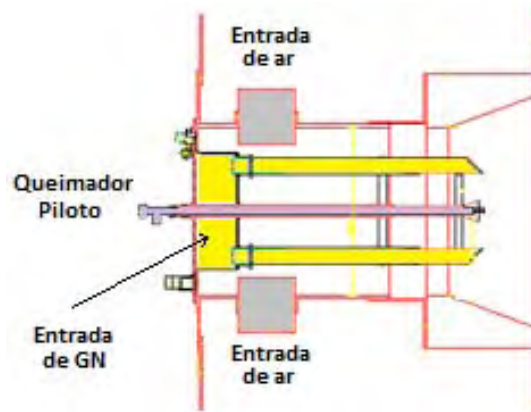


Figura 38: Queimador INGENER

3.3.2 Metodologia de medição de volume de GN

A comercialização do Gás Natural (GN) no Brasil é feita considerando o valor energético do volume de gás, no caso do Estado de São Paulo onde a distribuidora é a Comgás, é dito, “m³ Comgas”, isto é, pelo contrato de fornecimento, volume de gás a 101 kPa (1 atm), a 20°C e 9400 kcal/m³ (COMGÁS, 2012b).

Para os cálculos referentes ao preço pago pelo gás natural usa-se o preço praticado e divulgado no diário oficial, onde o valor é referente à m³ Comgas levado em consideração o poder calorífico do gás.

Para os cálculos de ganhos energéticos os volumes de consumo são em Nm³, referente a 101 kPa (1 atm) e 0°C.

Para a obtenção do valor medido de gás que será cobrado e identificado na fatura é utilizado a Equação 1, que consta no site da Compagas (Compagas,2012):

$$V_{Final} = V_{medido} \left[\frac{PCS}{9400} \times \frac{P_m + P_{atm}}{P_r} \times F.s.c. \times \frac{T_r}{T_m} \right] m^3_{Concessionária} \quad (Eq.1)$$

Correção de
poder
calorífico

Correção de
pressão

Coefficiente de Super
compressibilidade = 1

Correção de
temperatura

Equação 1: Cálculo de volume GN para comercialização.

V_{Final}	Volume em $\text{m}^3_{\text{Comgas}}$, ou seja, à pressão de 101 kPa (1 atm), à temperatura de 20°C e com o poder calorífico superior de 9400 kcal/ m^3 .
V_{medido}	Volume em m^3 resulta da diferença entre a leitura final e a leitura inicial, no período considerado (mês, semana, turno, etc.), efetuada no medidor instalado, na suposição deste ser um medidor simples que meça o volume do gás (vazão) sem nenhuma correção de pressão e/ou temperatura.
PCS	Poder calorífico superior real do gás fornecido, determinado periodicamente por Petrobras e Comgas. O valor médio mensal desta grandeza, dividido pelo valor contratual de 9.400 kcal/ m^3 , resulta num coeficiente de correção que figura na fatura mensal da Comgas.
P_m	Pressão da rede (no caso de Pindamonhangaba, 400 kPa (4 bar)).
P_{atm}	Pressão atmosférica do local em que se realiza a medição (Pindamonhangaba, 95,367 kPa (953,67 mbar) relativo à altitude).
P_r	Pressão de 101 kPa = 1 atm = 1,01325 bar
T_m	Temperatura ambiente na escala Kelvin do local onde se realiza a medição
T_r	Temperatura de 20°C = 20 + 273,15 = 293,15 K
Fsc	Os fatores de compressibilidade dos gases existem em qualquer condição em que eles se encontram e correspondem ao desvio da Lei dos Gases Perfeitos.

Para a conversão da medição em m^3 para Nm^3 devemos usar a equação 2.

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} \quad \text{Eq (2)}$$

P_1	Pressão da rede fornecimento – 400 kPa (4 bar)
V_1	Volume da medição em m^3 concessionária
T_1	Temperatura do GN padrão concessionária a 20°C = 293,15 K
P_2	Pressão da rede fornecimento – 400 kPa (4 bar)
V_2	Volume do GN em Nm^3
T_2	Temperatura do GN a 0°C = 273,15 K

3.3.3 Características do combustível atual (gás natural)

A composição do Gás Natural de Petróleo varia consideravelmente em função do local de exploração, obrigando os fabricantes de equipamentos realizarem o redimensionamento em função da composição do Gás da região de aplicação.

A Tabela 6 apresenta a composição do gás natural brasileiro COMGÁS – Companhia de Gás do Estado de São Paulo (SILVEIRA & TUNA, 2003).

Tabela 6: Composição do gás natural

Componente	Volume (%)	Massa (%)	PCI (kJ/kg)
CH ₄	89,35	80,92	50000
C ₂ H ₆	8,03	13,64	47525
C ₃ H ₈	0,78	1,94	46390
C ₄ H ₁₀	0,07	0,23	45775
C ₅ H ₁₂	0,01	0,04	45400
CO ₂	0,48	1,20	-
N ₂	1,28	2,03	-
Total	100,00	100,00	47966

3.4 Sistema atual de bombas ejetoras

O sistema de bombas ejetores demonstrado na figura 39 tem a premissa de atingir 67 Pa (0,5 torr) em no máximo 7 minutos partindo de 101 kPa (1 atm) e permanecendo por mais 10 minutos, condição necessária para o processo de degaseificação.

O sistema atual possui três conjuntos de grande vazão (SE1 a 3) responsáveis por reduzir a pressão de 101 kPa (1 atm) até próximo de 1333 Pa (10 torr) e mais 5 conjuntos (SE4 a 8) que juntamente com o primeiro estágio reduzem a pressão para os 67 Pa (0,5 torr) necessários no processo.

Os condensados são separados por grupos e são responsáveis pelo aumento drástico da vazão nos ejetores pelo resfriamento do vapor superaquecido provocando a redução do volume deste e por consequência a redução da pressão. Estes são os grandes consumidores de água de resfriamento em torno de 1300 m³/h.

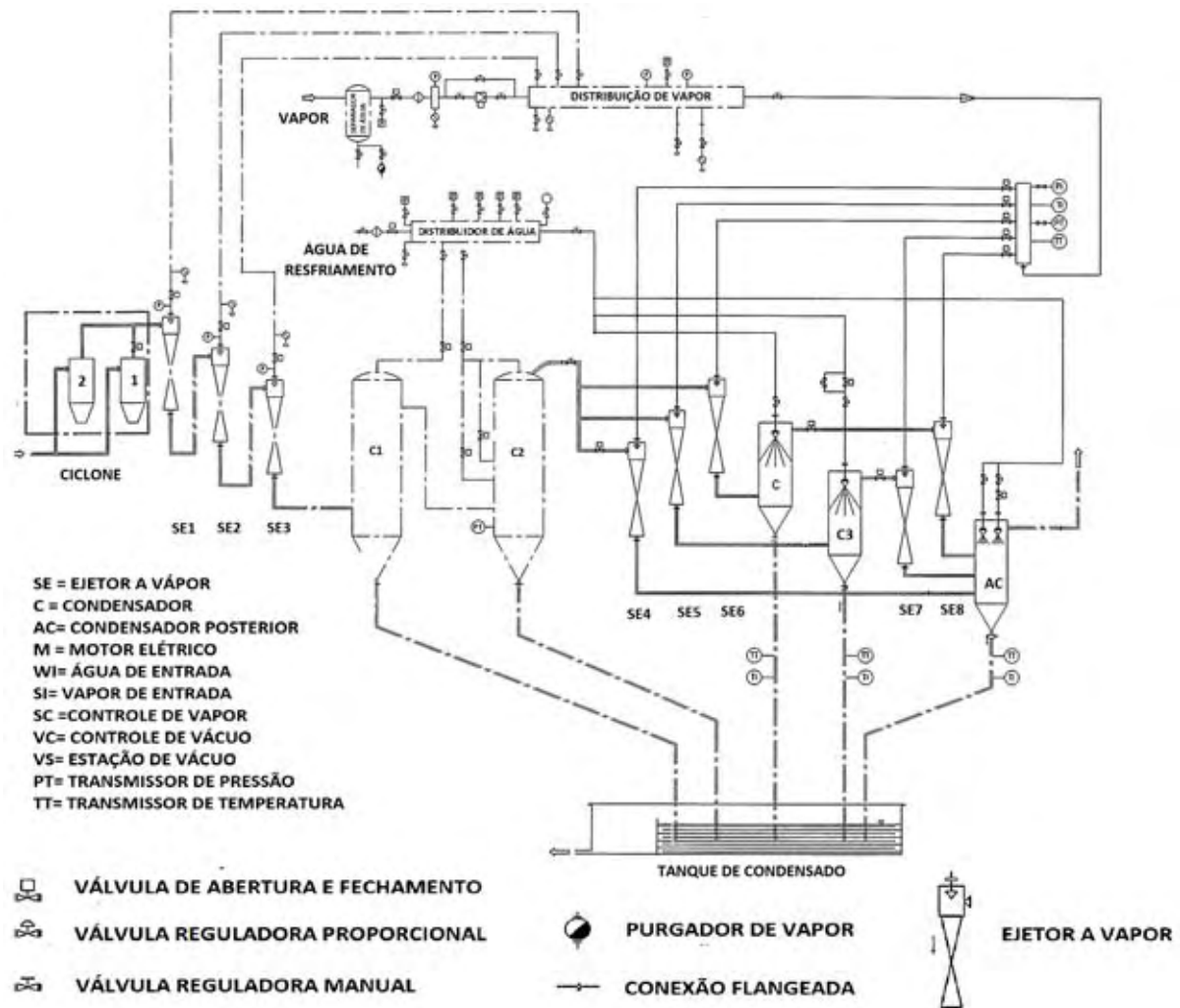


Figura 39: Esquema do sistema de ejetor em estudo

Neste sistema temos algumas desvantagens significantes:

- Perdas de eficiência energética devido a necessidade de iniciar o vácuo na pressão atmosférica, perdendo toda essa energia no final de cada ciclo, característica do sistema de ejetores atual.
- Alto consumo de água usada nos ejetores combinado com os condensadores do vapor superaquecido necessita consumir $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1300 \text{ m}^3/\text{h}$) de água industrial a 30°C para aumentar a velocidade de arraste do venturo,
- Perda de eficiência do sistema de vácuo com a elevação da temperatura da água dos ejetores e condensadores.
- Contaminação da água pela sujeira do gás aspirado da panela que contem o aço derretido a 1600°C , gerando uma grande quantidade de efluente contaminado.

O sistema de vácuo permite a operação em dois processos:

1 – Realização de vácuo em um tanque de desgaseificação SD com fundição simultânea.

Na figura 40 temos o desenho do sistema de vácuo com adição de aço, este método é necessário quando é feito o vazamento do aço com a realização de vácuo simultâneo e adição de liga no cadinho intermediário, dando assim as propriedades químicas e físicas ao metal lingotado.

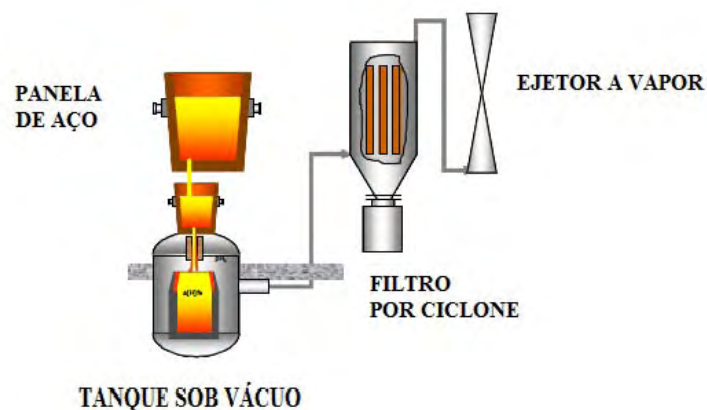


Figura 40: Desenho do sistema de vácuo com adição de aço

2 – Realização de vácuo no Forno Panela.

Neste segundo processo conforme demonstrado na figura 41 o vácuo é feito em panelas com o aço já dentro da panela, sendo um processo mais simples com o objetivo principal de remover os gases do aço. Como o aço líquido está parado na panela se faz necessário à injeção de gás argônio no fundo da panela para provocar a agitação do líquido e como é um gás inerte não interfere na composição e não se mistura ou combina com outros elementos.

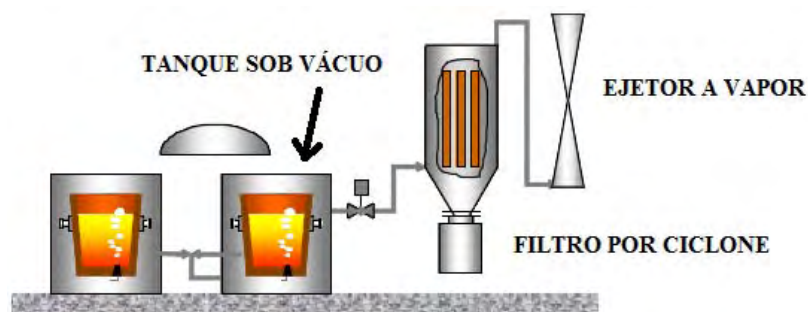


Figura 41: Desenho do sistema de vácuo em forno panela

3.5 Consumo específico do sistema de geração de vácuo atual

O sistema consiste na operação de duas caldeiras idênticas de 2.0 MPa (20kgf/cm²) e 18 t de capacidade de geração de vapor superaquecido a 250°C simultaneamente, fornecendo vapor para um sistema de ejetor de vapor para a produção de vácuo, usado no sistema de desgaseificação do aço.

3.5.1 Consumo específico sistema de geração de vapor

Foi realizado o acompanhamento do consumo de gás natural da caldeira durante os anos de 2009 a 2011 onde obtivemos os consumos normalizados conforme tabela 7.

Tabela 7: Consumo de gás natural da Caldeira

Caldeira		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2009	kNm ³	259	252	416	381	353	311	424	473	493	498	427	295
2010	kNm ³	438	456	529	542	498	486	517	492	461	413	272	318
2011	kNm ³	386	382	414	481	502	464	504	535	491	511	470	502

A figura 42 nos apresenta o ciclo de funcionamento do sistema de vapor que opera 15 minutos a cada hora por ciclos regulares, totalizando 22 ciclos de operação do sistema de vapor por dia, partindo de zero tonelada de vapor e imediatamente após a abertura da válvula sobe para próximo de 14 t/h para os ejetores e mais 4 t/h para o desaerador permanecendo por 15 a 20 minutos e retornando a zero no final do ciclo de desgaseificação do aço.



Figura 42: Regime de operação da caldeira

A caldeira tem sua eficiência comprometida devido ao regime de trabalho que não é contínuo, fazendo a caldeira ter choques térmicos a cada partida do sistema de vácuo operando com capacidade máxima durante os cinco primeiros minutos até atingir o vácuo menor que 67 Pa (0,5 torr) e manter por 10 minutos para remoção dos contaminantes do aço e após o término da desgaseificação ficando na potência mínima ou desligada para não elevar a pressão do vapor (Edwards, 2012c).

Quando ajustamos a relação ar/gás no queimador é para a condição de 100% da carga e na condição de baixa carga ou nenhuma o queimador fica com um excesso de ar e a eficiência fica comprometida.

Como o regime de utilização durante o mês tende a se manter constante é possível buscar um acompanhamento da eficiência e maximizar o ajuste de relação ar/gás.

No figura 43 é possível observar que nos últimos três anos o consumo específico da caldeira tem se mantido em valores próximos, demonstrando uma regularidade tanto do processo como no consumo específico da caldeira.

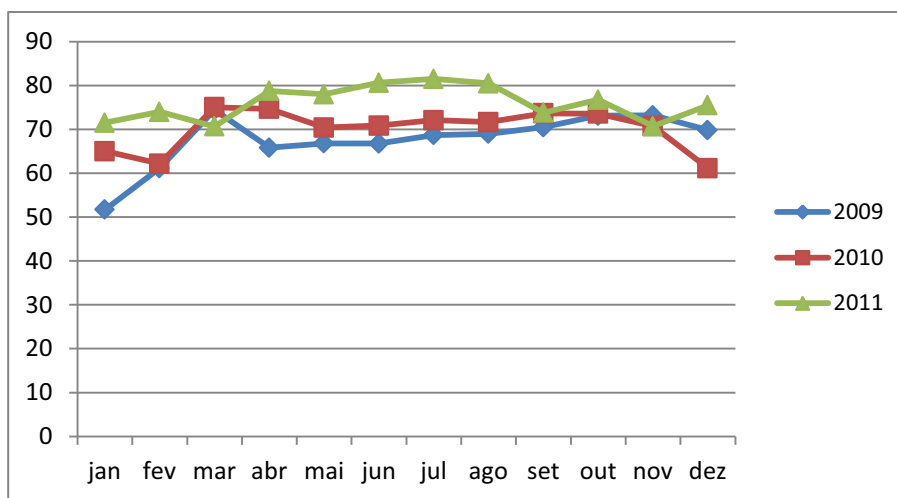


Figura 43: Curva de consumo específico da caldeira Nm^3/t vapor

Na figura 44 são apresentadas as curvas de rendimento energético onde se observa que temos um consumo energético elevado para o seu objetivo que é produzir de forma indireta o vácuo necessário no processo em comparação com sistema misto de ejetor a vapor com bombas de anel líquido ou mecânicas.

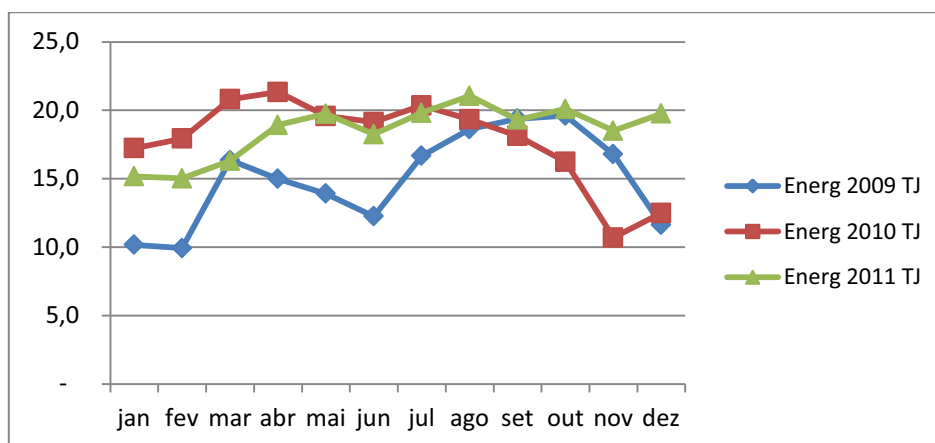


Figura 44: Consumo energético da caldeira TJ/mês

3.5.2 Consumo específico do sistema vapor/vácuo

Na figura 45 observa-se que o consumo específico de vapor por tonelada de aço líquido tende a cair no início do ano devido à queda no nível de produção, diminuindo o aproveitamento e a eficiência da caldeira.

O início do ano em 2009 foi um ano atípico devido à crise mundial de outubro de 2008 que se estendeu até o primeiro semestre de 2009, demonstrando o impacto que o nível de produção causa na eficiência da caldeira, principalmente porque a caldeira precisa sempre ficar aquecida e pronta para o pico de consumo.

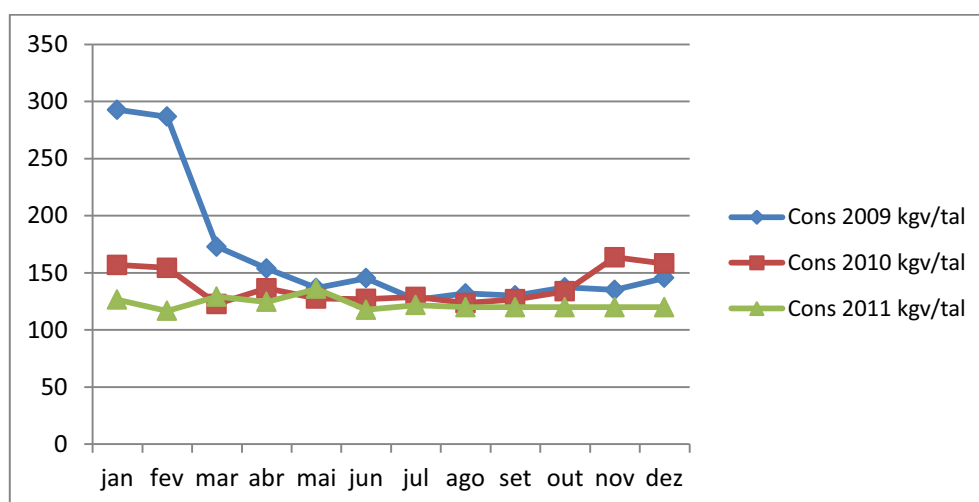


Figura 45: Consumo específico de vapor em kg por tonelada de aço líquido

3.5.3 Consumo energético

Na figura 46 temos o consumo específico em Giga joule por toneladas de aço líquido, constatando-se um comportamento muito semelhante com o consumo de vapor demonstrando uma estabilidade na eficiência da caldeira.

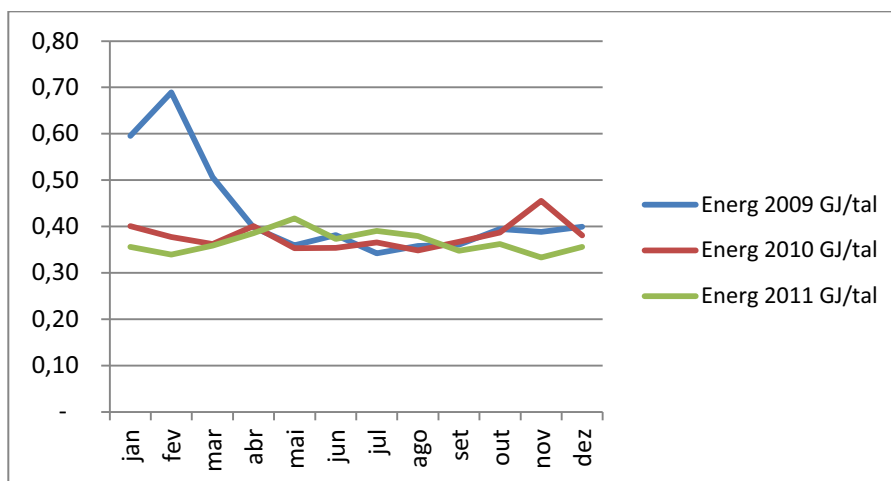


Figura 46: Consumo energético Giga Joule por tonelada de aço líquido

3.5.4 Aspectos ambientais

3.5.4.1 Contaminação da água

O arraste de pó para dentro dos ejetores a vapor e consequentemente para a água industrial é de 1-2 kg Mn/Cr/Fe (Edwards, 2012) de pó por semana, necessitando de uma estação de tratamento de água para realizar a remoção desses contaminantes, sendo extremamente onerosa sua instalação, manutenção e operação.

O sistema de bombas ejetoras consome nos condensadores $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1300 \text{ m}^3/\text{h}$) de água industrial quando em funcionamento elevando em 10°C a temperatura, que precisa ser resfriado e novamente bombeado.

3.5.4.2 Contaminação do ar

Com a desativação das caldeiras a geração de gases como NO_x e CO_x resultado da combustão do Gás Natural deixam de ser gerados, eliminando esse contaminante do ar.

3.6 Custo operacional do sistema existente

A figura 47 mostra o fluxo de energia e insumos necessários para a produção de vácuo a partir do vapor, onde podemos dividir o sistema em Tratamento de água para caldeira, caldeira, transporte do vapor, sistema de geração de vácuo através dos ejetores e propriamente a central onde é utilizado o vácuo.

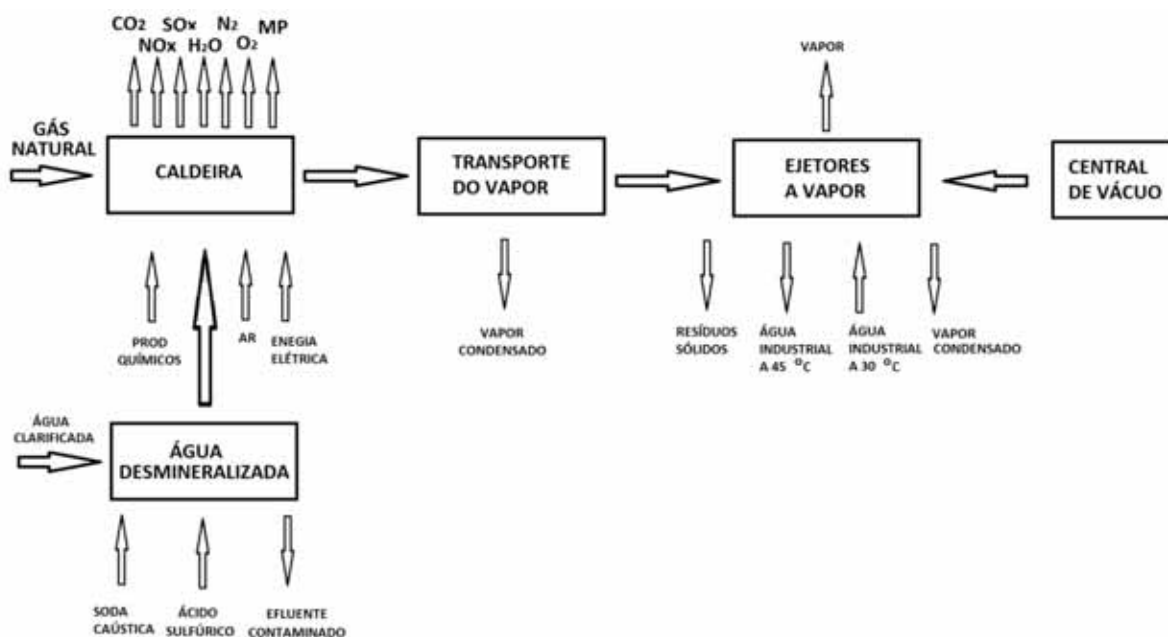


Figura 47: Fluxo de energias para produção de vácuo a partir de vapor

O sistema de tratamento de água para Caldeira é composto por um sistema de clarificação e desmineralização, primeiramente é captada água diretamente do rio e enviado para um clarificador por floculação e decantação retirando a lama e material orgânico, após a água é transportada para uma central de desmineralização composta por vasos de troca iônica, sendo o primeiro de resina catiônica em seguida o de resina aniônica e o terceiro com carvão ativado para retirar algum residual de cloro e filtragem.

A resina aniônica e catiônica perde suas características com a passagem da água bruta pelos vasos e para realizar a ativação é necessário fazer a contra lavagem dos vasos com soda cáustica e ácido sulfúrico, cada qual em sua resina específica e consequentemente gera um efluente dessa lavagem.

A caldeira tem seu rendimento próximo a 80% em transformar a água desmineralizada em vapor superaquecido, utilizando como fonte principal de energia o Gás Natural canalizado.

O transporte do vapor superaquecido até a central de vácuo implica em perda de calor por transferência térmica para a tubulação e para o meio, causando a condensação do vapor e este é expurgado da rede pelos purgadores ao longo dos 800 metros de tubulação.

3.6.1 Cálculo do custo do gás natural

Para os cálculos utilizou-se o preço do GN do dia 06/04/2012 para o segmento industrial, classe 6, sem ICMS, área de concessão da Comgás, Deliberação ARSESP nº 283, de 08/12/2011, com vigência a partir de 10/12/2011 (COMGÁS,2012a), demonstrado na tabela 8.

Tabela 8: Tarifa do gás natural canalizado COMGÁS.

Classes	Volume m³/mês	Valores sem ICMS		Valores com ICMS	
		Fixo - R\$/mês	Variável - R\$/m³	Fixo - R\$/m³	Variável - R\$/m³
1	Até 50.000,00 m³	144,66	1,422841	164,39	1,616865
2	50.000,01 a 300.000,00 m³	22.632,66	0,973062	25.718,93	1,105752
3	300.000,01 a 500.000,00 m³	37.721,11	0,922723	42.864,90	1,048549
4	500.000,01 a 1.000.000,00 m³	42.349,39	0,913467	48.124,31	1,038031
5	1.000.000,00 a 2.000.000,00 m³	61.266,95	0,894549	69.621,53	1,016533
6	>2.000.000,00	94.650,87	0,877857	107.557,81	0,997565

Fonte: COMGÁS (2012a)

Fórmula do cálculo do custo final:

$$I = F + (CM \times V) \quad (\text{Eq. 3})$$

I= custo final

F= valor do encargo fixo

CM= Consumo mensal em m³

V= Valor de encargo variável

Para os cálculos utilizamos a equação 3 e o volume de Gás Natural consumido em toda a empresa no mês de Agosto de 2011, valor esse que determina a tarifa da fatura mensal.

$$I = 94.650,87 + (5.110.000 \times 0,877857)$$

$$I = 4.580.500 \text{ R\$}$$

$$\text{Preço do gás Natural} = 0,896380 \text{ R\$ / m}^3$$

3.6.2 Cálculo do custo de energia elétrica

Para os cálculos de Energia Elétrica considerou-se consumidor livre, modalidade A2 – Horo sazonal Azul, concessionária EDP Bandeirante Energia, vigência Agosto/2011, conforme resoluções a ANEEL:

- 1) RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 1.072, DE 5 DE OUTUBRO DE 2010.
- 2) RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 1.222, DE 18 DE OUTUBRO DE 2011.

O custo médio de energia elétrica no Brasil é uma composição dos custos do preço de energia, custo de uso do Sistema de Distribuição mais os encargos demonstrados na tabela 9.

Neste cálculo foi considerado o volume de energia e demanda contratada para toda empresa, onde a Caldeira usufrui dos mesmos preços médios da empresa.

Tabela 9: Custo da energia elétrica

ENERGIA ELÉTRICA	Demanda (kWh)	Custo Unit. (R\$/Mwh)	Custo Total (R\$)
Demanda Ponta	80.000	19,12	1.529.600
Demanda Fora Ponta	94.000	2,56	240.640
ENERGIA ELÉTRICA	Consumo (Mwh)	Custo Unit. (R\$/Mwh)	Custo Total (R\$)
Energia Livre	49.704.768	107,24	5.330.288
Encargos Livre	49.704.768	31,83	1.582.103
Encargo Serviço Sistema	50.947	5,00	254.737
Energia elétrica consumo	49.705	142,85	7.100.528
TOTAL EN. ELÉTRICA	49705	179,81	8.937.368

Fonte: ANEEL (2012).

O regime de trabalho para as bombas e motores elétricos envolvidos no sistema de geração de vácuo atual é ininterrupto durante todas as horas do mês, tanto no horário de ponta ou fora ponta não havendo diferenças de consumo nesses horários.

Na tabela 9 obtemos que o custo médio de energia elétrica é 179,81 R\$/Mwh que será aplicado na elaboração do custo operacional do sistema na tabela 10.

3.6.3 Custo operacional do sistema de geração de vácuo.

Para a elaboração dos custos operacionais do sistema de vácuo para a produção de uma tonelada de aço líquido, considerou-se o perfil de operação dos meses de janeiro a agosto de 2011.

Foram considerados todos os custos envolvidos como gás natural, energia elétrica, manutenção rotineira, manutenção obrigatória, consumo de químicos, mão de obra e consumo de água.

Para realizarmos a comparação do consumo energético do sistema existente convertemos os consumos energéticos para GJ, portanto descrevemos os valores considerados:

- 1Mwh = 3600 MJ
- 1 Gcal = 4,1868 GJ
- 1 Nm³ de GN= 0,0094 Gcal
- 1 cv = 0,736 kW
- η = 0,845 para as bombas elétricas

Na tabela 10 considerou-se todos os custos envolvidos no processo de geração de vácuo descrito na figura 47, como desmineralização, geração de vapor, bombeamento de água industrial utilizada nos ejetores e o custo de manutenção e operação ininterrupta durante o mês, regime normal de operação.

Desmineralização:

- Custo de tratamento da água clarificada com o uso de soda cáustica e ácido sulfúrico utilizado na ativação das resinas aniônicas e catiônicas.

Geração de vapor para os ejetores:

- Custo com energia elétrica utilizada no ventilador do ar de combustão da caldeira potência de 2x25cv e da bomba de fornecimento de água desmineralizada, desaerada e pré-aquecida para a caldeira de vapor potência de 100 cv.
- Custo com o gás natural queimado na caldeira para a geração de vapor superaquecido.
- Custo com os produtos químicos para a remoção de oxigênio da água desmineralizada evitando a corrosão das partes internas da caldeira.
- Custo de manutenção com inspeção anual, troca de rolamentos, revisão de válvulas e substituição de tubos.
- Custo operacional com mão de obra especializada em atendimento a NR-13.

Bombeamento de água industrial para ejetores a vapor.

- Custo com energia elétrica nas bombas de fornecimento de água para os ejetores 1x350 cv, 1300 m³/h, 4,5 kgf/cm² e com a bomba de recalque de água do tanque de água quente para a torre de resfriamento, potência de 2x250 cv, 750 m³/h, 2,5 kgf/cm².

Sistema de desgaseificação:

- Custo de manutenção para a troca de válvulas de vácuo, revisão dos ejetores, substituição das vedações das tampas e limpeza anual.

Tabela 10: Custo operacional do sistema existente

Descrição	Quant			Quant / mês	GJ / mês	Custo Anual R\$	R\$/t
Energia elétrica							
Ventilador Caldeira	2	25	cv	31.356	113	67.658	0,10
Bombas de recirculação de água Caldeira	1	100	cv	62.712	226	135.315	0,20
Gás Natural			m³	472.343	18.589	5.080.786	7,63
Tratamento de água Desmi	1	10	cv	6.271	5	53.931	0,08
Produtos químicos para Caldeira	2	1	cv	1.254	1	32.706	0,05
Manutenção				14.082		168.984	0,25
Inspeção anual				25.500		25.500	0,04
Mão de obra dos operadores				32.552		390.626	0,59
Tratamento de água industrial							
Bombeamento recalque 1300 m³/h	2	250	cv	78.391	282	14.095	0,02
Bombeamento Recirculação 1300 m³/h	1	350	cv	54.873	198	49.187	0,07
Manutenção do sistema de Desgaseificação				10.000		120.000	0,18
Total					19.414	6.138.788	9,21

Observamos na tabela 10 que o custo mais significativo é com gás natural utilizado na caldeira representando 7,63 R\$/t, tem-se um indicativo que os esforços para melhorar a eficiência energética dos equipamentos serão pouco significante perto do custo do gás natural.

4 SISTEMA DE VÁCUO COM BOMBA MECÂNICA SECA

4.1 Aspectos gerais

O sistema de bomba mecânica seca tem como principal fabricante e desenvolvedor dessa tecnologia para uso em siderurgia a Empresa Boc Edwards.

A Edwards High Vacuum, estabelecida em 1919 e adquirida pela BOC em 1968, a Edward se integra com a BOC em 1998 formando a BOC Edwards e em 2001 adquiriu a Stokes, Hick Hargreaves e Hibon com o objetivo de aumentar sua atuação no ramo industrial (EDWARDS, 2012a).

A aplicação de bombas mecânicas em metalurgia secundária começou a ser difundida na última década, com algumas instalações que já estão em funcionamento, outras em início de operação e outras ainda em implantação ao redor do mundo.

Sistema em pleno funcionamento:

- COST (12t VD), Rybnitsa(95t VD), ORI Martin (75t VD)
- ASO2 (40t VD), von Moos Stahl (75t VD)
- Lehigh (41t stream VD), USA -3 modules

Sistema em início de operação:

- ASO3 (53t VD), Italy -3* IDX1000
- CAF (35t VD), Spain -2* [SN7000>IDX1000]

Sistemas em processo de fabricação:

- | | | | |
|-------------------|------------|---------|------------|
| • EMSS Kramatorsk | (100t VD), | Ukraine | -5 modules |
| • Kardemir | (90t VD), | Turkey | -4 modules |
| • Nijny | (20t VD), | Russia | -1 module |
| • SWT | (60t VD), | Germany | -3 modules |
| • Asov mash | (60t VD), | Ukraine | -3 modules |

4.2 Bomba de vácuo Edwards

Na figura 48 observa-se que cada conjunto é composto por três máquinas em série, sendo duas Roots e um compressor tipo parafuso, os módulos são independentes e sua quantidade é definida pela vazão e vácuo final da aplicação.

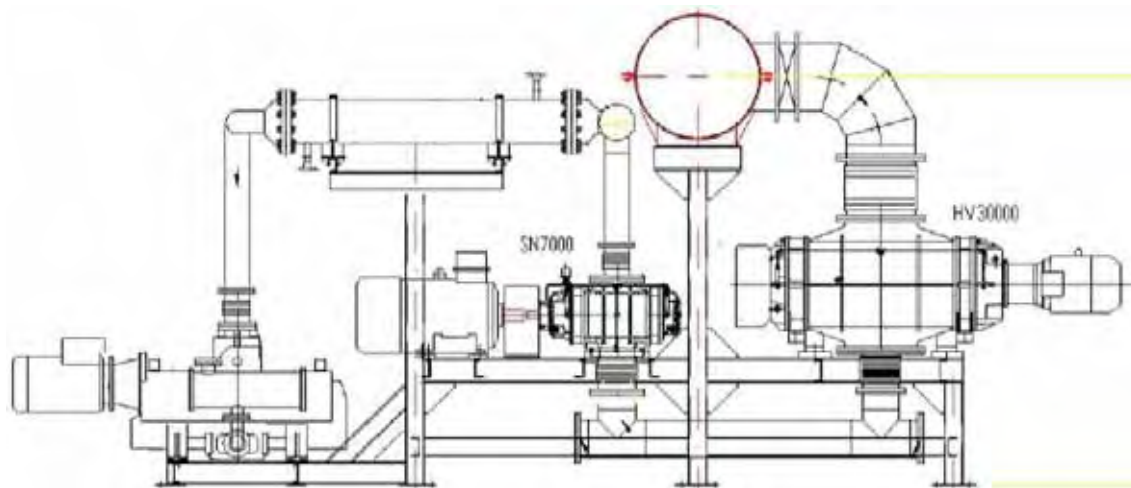


Figura 48: Detalhe mecânico do conjunto de bomba seca (EDWARDS, 2012a).

Como os módulos são padrão e a quantidade de módulos é definida pela aplicação tem-se na tabela 11 uma referência da (EDWARDS, 2012a) para aplicações típicas.

Tabela 11: Quantidades típicas de módulos de 3 estágios (EDWARDS, 2012a).

Tonelada VD	Fluxo Mássico necessário kg/h	Volume típico total m ³	Vazão de bombeamento a 0,67 mbar m ³ /h	N. de módulo padrão
23	23,1	65	29000	1
46	46,2	130	58000	2
69	69,3	193	87000	3
92	92,4	258	116000	4
115	115,5	322	145000	5
138	138,6	386	174000	6
161	161,7	451	203000	7

A figura 49 apresenta um sistema de bombas secas para uso em aplicações siderúrgicas fabricados pela BOC Edwards que podem ser montados em um único conjunto ou em módulos separados visando a otimização do espaço.



Figura 49: Foto da bomba seca (EDWARDS, 2012a).

4.3 Sistema proposto de produção de vácuo

O sistema proposto prevê a substituição do sistema existente com as mesmas características de capacidade e vácuo final.

- 1- Atingir vácuo final de 67 Pa (0,67 mbar) em até 6 minutos.

A figura 50 mostra a montagem para operar com duas estações de bombas, a bomba B1 está dimensionada para realizar o vácuo nos tanques que são usados no Forno Panela indicados por TA e TB de forma não simultânea. A bomba B2 operando em conjunto com a B1 têm condições para de realizar o vácuo nos tanques TC e TD, também de forma não simultânea.

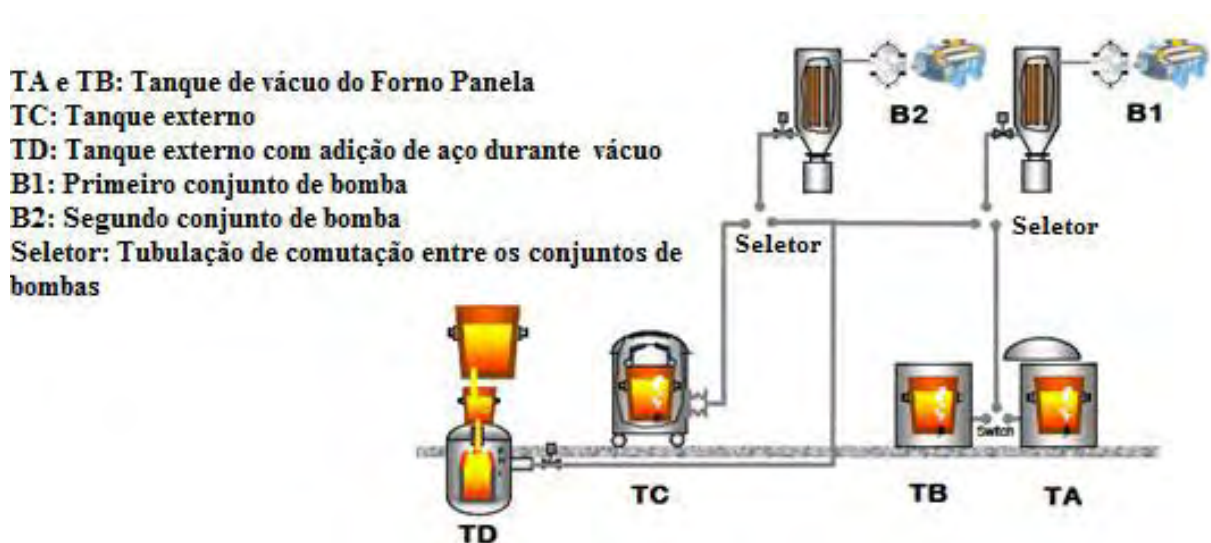


Figura 50: Sistema de vácuo proposto

O sistema de vácuo sugerido com bomba seca é composto por dois conjuntos idênticos B1 e B2 representado um deles na figura 51, cada conjunto é constituído por 3 estágios, sendo o primeiro com 7 bombas de lóbulos de grande capacidade de $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$ ($30000 \text{ m}^3/\text{h}$), o segundo estágio também é composto por 5 bombas de lóbulos de vazão de $3,89 \text{ m}^3/\text{s}$ ($14000 \text{ m}^3/\text{h}$) e o terceiro estágio por 5 bombas de garra $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ ($4000 \text{ m}^3/\text{h}$) GV400 DRYSTAR (EDWARDS,2012b).

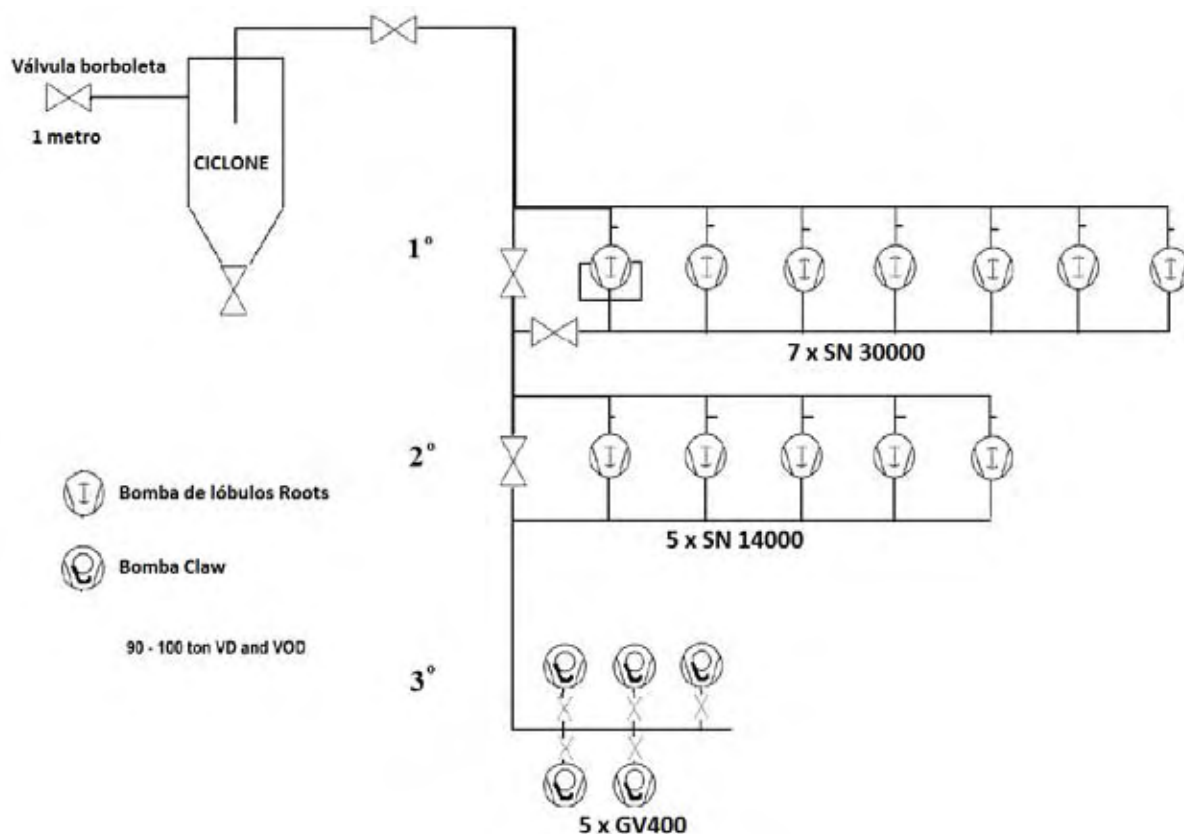


Figura 51: Sistema de vácuo para VD de 100t

Para o dimensionamento do sistema foi considerado a entrada de ar falso em todas as vedações, visto que o processo siderúrgico é uma aplicação agressiva com equipamentos pesados, grandes volumes e muita sujeira e resíduos.

Na figura 52 os três métodos distintos de operação do sistema proposto, podendo ser com um conjunto de bomba apenas para realizar vácuo nos Fornos Panela alternadamente demonstrado na figura 52c, o outro conjunto de bomba para realizar vácuo no carro panela demonstrado na figura 52b e o terceiro para realizar vácuo em tanque com adição de liga demonstrado na figura 52a que depende da operação simultânea dos dois conjuntos de bombas para suprir a entrada de ar e aço líquido pelo cadinho de adição.

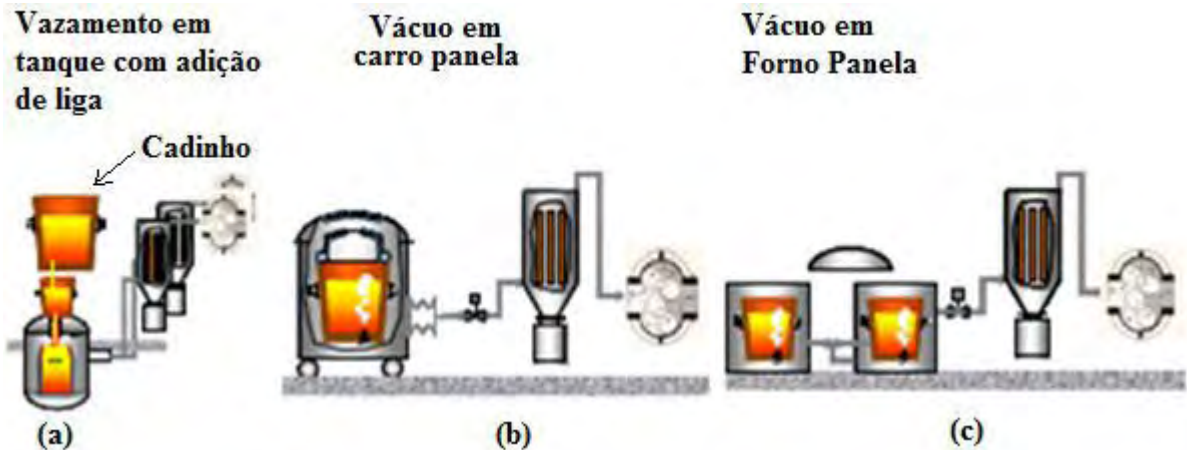


Figura 52: Opções de utilização no sistema proposto: (a) Vazamento em tanque com adição de liga; (b) Vácuo em carro panela; (c) Vácuo em Forno Panela

4.3.1 Utilidades

4.3.1.1 Consumo de água industrial

Cada conjunto de bombas de 3 estágios usa $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$ de água industrial para refrigeração interna sendo no primeiro estágio 6+1 (Bomba reserva) mais o segundo estágio 4+1 (Bomba reserva), o terceiro estágio não utiliza água, totalizando 10 bombas em uso com um consumo $26 \text{ m}^3/\text{h}$ em sua condição máxima de operação e $15 \text{ m}^3/\text{h}$ de consumo médio.

A tubulação de refrigeração da tubulação do Forno Panela consome $125 \text{ m}^3/\text{h}$ em condição normal de operação. Como está sendo comparado sistema com a mesma capacidade e finalidade deve ser considerado apenas o consumo de água dos conjuntos de bombas.

4.3.1.2 Consumo de energia elétrica

Cada conjunto de bombas consomem 985 kW em sua capacidade máxima para atendimento dos sistema TA ou TB. Para realização de vácuo no sistema TC ou TD necessita a operação simultânea dos dois conjuntos de bombas totalizando uma capacidade máxima instalada de 1970 Kwh.

Regime de trabalho por ano: 532 corridas de vácuo no forno Panela e 80 no tanque externo, mesmo regime do existente.

Cada fornada produz de 95 toneladas de aço líquido por corrida do Forno de Fusão (FEA), onde foi considerada uma produção média de 55.525 toneladas por mês.

4.4. Consumo específico do sistema proposto

O consumo previsto de energia elétrica para o sistema de bombas mecânicas é 0,9 kW/tonelada de aço líquido (Edwards, 2012c), considerando o mesmo regime de trabalho.

4.5 Custo operacional do sistema proposto

O sistema proposto está dimensionado para as mesmas condições operacionais e de capacidade de geração de vácuo do sistema existente conforme descritos na tabela 12 e 13 atendendo as mesmas características exigidas pelo processo metalúrgico.

Considerações:

- Sistema de vácuo em tanque lateral (*Side Stream*): 8 processos de vácuos por duas horas cada durante o mês com os dois grupos de bombas ligados ao mesmo tempo.
- Sistema de vácuo em Forno Panela: 22 processos de vácuos por 0,5 horas, já considerando a manutenção do vácuo dentro do duto durante as trocas de painéis.

Tabela 12: Dimensionamento do sistema de desgaseificação

Sistema de Desgaseificação	Valores
Diâmetro do tanque	5'844 mm
Altura do tanque	5'927 mm
Diâmetro da linha de sucção	1'200 mm
Resfriamento de água	125 m ³ /h do duto resfriado
Queda de pressão do filtro	< 0,15 Pa
Tempo de vácuo	< 4 minutos

Tabela 13: Dimensionamento do sistema de Sucção

Bombas de Sucção	Valores
Potência instalada B1+B2	2 conjuntos de 985 kW
Consumo de energia ¹	0,9 kwh/t aço líquido
Água de resfriamento do Forno Panela	125 m ³ /h por conjunto
Consumo de nitrogênio	15 m ³ /h por conjunto
Pressão de trabalho TA e TB	50 a 60 Pa (0,38 a 0,45 torr)
Pressão de trabalho TC e TD	80 a 100 Pa (0,6 a 0,75 torr)

¹ Consumo específico para dois conjuntos conforme Edwards, 2012c.

O processo de vácuo proposto possui dois conjuntos de bombas mecânicas secas, sendo um utilizado apenas quando fazemos vácuo no Forno Panela e o segundo quando utilizamos o vazamento com adição de liga, neste é necessário ligar os dois conjuntos simultaneamente.

Para o sistema de vácuo com bomba mecânica seca é necessário à utilização de 15m³/h de nitrogênio no selo na vedação das bombas, apenas quando o sistema está em operação.

Tabela 14: Custo operacional do sistema proposto

Descrição	Quant	Potência	Quant / mês	GJ / mês	Custo Ano R\$	R\$/t
Energia elétrica						
Bombas mecânicas secas de vácuo para VD	1	985 kw	325.050	1.171	701.363	1,05
Bombas mecânicas secas de vácuo para SD	1	985 kw	63.040	227	136.022	0,20
Tratamento de água industrial						
Bombeamento de água industrial recalque	2	50 kw	72.000	259	155.355	0,23
Bombeamento de água industrial Recirculação	1	50 kw	36.000	130	77.678	0,12
Manutenção do sistema de Desgaseificação ¹			5.000		60.000	0,09
Nitrogênio 15 m ³ /h	1	15 m ³	10.800		7.128	0,01
Total				1.787	1.130.418	1,71

¹(TENGLER, 2004)

Através da tabela 14 obtêm-se o custo operacional do sistema proposto de 1,71 R\$/t, indicando um resultado excelente em comparação com o consumo operacional do sistema existente de 9,21 R\$/t, representando um custo operacional 5,4 vezes menor.

5 RECUPERAÇÃO DO CRÉDITO DE CARBONO

O crédito de carbono surgiu com a criação do Mecanismo de Desenvolvimento limpo (MDL) na reunião para assinatura do Protocolo de Quioto (Brasil, 2008).

Os créditos de carbono são certificações dadas a empresas e indústrias que reduzem a emissão de gases poluentes na atmosfera, cada tonelada de CO₂ que é absorvida (sequestro de carbono) ou a quantidade de gases poluentes que deixam de ser produzidos pela empresa classificada como poluidora é convertida em uma unidade de crédito de carbono, que é negociada em dólar no mercado mundial.

Com a desativação das caldeiras de geração de vapor elabora-se o projeto para a recuperação dos créditos de carbono e reverte o crédito em retorno financeiro utilizando a metodologia do IPCC.

5.1 Metodologia de cálculo das emissões dos gases de efeito estufa

Toda emissão de gás de efeito estufa, de acordo com as recomendações do IPCC, deve ser calculada como um produto de um **Dado de atividade** por um **Fator de emissão** adequado. Ou seja, a quantidade de combustível utilizado, considerando a maneira como ele é utilizado.

A equação 4 deve ser utilizada para calcular as emissões (IPCC, 2006):

$$E = DA \cdot FE \quad (\text{Eq.4})$$

Onde,

E é o valor da emissão de um gás de efeito estufa, dado em unidade de massa ou volume do gás em questão. Exemplos: t CO₂, kg CH₄, t SF₆, etc.

DA é o valor do dado de atividade, que expressa a intensidade de uma fonte emissora. Exemplos: consumo de óleo diesel em geradores de energia elétrica (em kg), consumo de gasolina de uma frota de automóveis (em kg), etc.

FE é o fator de emissão, que expressa o quão intensiva é uma dada atividade em termos de emissão de gases de efeito estufa. Exemplos: fator de emissão de dióxido de carbono no uso de óleo diesel em geradores de energia elétrica (dado em t CO₂/kg de

óleo diesel), fator de emissão de metano na combustão da gasolina em veículos automotores leves (dado em kg CH₄/kg de gasolina), etc.

Os principais gases de efeito estufa decorrentes de atividades antrópicas são mostrados na Tabela 15 considerando a atividade de queima de GN em caldeira, porém nem todos apresentam o mesmo potencial de reter o calor dentro do planeta. A capacidade desses gases em contribuir para o aquecimento global é medida por um indicador chamado de Potencial de Aquecimento Global (GWP), que indica a contribuição relativa de cada gás, por unidade de massa, comparada à do dióxido de carbono (CO₂).

Tabela 15: Gases de efeito estufa do GN e respectivo GWP

	Fórmula	Potencial de aquecimento global (GWP)	Tempo de vida na atmosfera (anos)
Dióxido de carbono	CO ₂	1	Variável
Metano	CH ₄	25	12
Óxido nitroso	N ₂ O	298	114

Fonte: IPCC (2007a)

5.2 Cálculo de emissão de CO₂

Para a elaboração do inventário adotou-se o Escopo 1 definido pelo IPCC.

O escopo 1 é o método padrão de análise que utiliza valores de referência para determinação das emissões. Exemplo: fator de emissão médio global de CO₂ em usinas termelétricas a gás natural (valor padrão).

Na tabela 16 temos os cálculos de emissão de CO₂ com base nos gases combustíveis contidos no Gás Natural conforme Diretrizes do IPCC, o volume considerado é o consumo de GN da Caldeira por ano em Nm³.

Utilizando a equação 2 converte-se a medição de gás natural consumido na caldeira por mês, 472.343 m³ (@ 20°C e 1 atma) padrão de medição COMGAS para Nm³ (@ 0°C e 1 atma), resultando em 5.281.412 Nm³ de consumo anual.

Tabela 16: Cálculo de emissão de CO₂ (Gomez, Watterson, 2006):

Combustíveis fósseis Consumo por tonelada produzida	Consumo em volume Nm ³	Fator de conversão kJ/un	Consumo GJ	Fator de emissão de CO ₂ kg CO ₂ /TJ	Emissões de CO ₂ t CO ₂	Emissões de CH ₄ kg CH ₄	Emissões de N ₂ O kg N ₂ O
Caldeira (Nm ³)	5.281.412	39.481	208.513	56.100	11.698	209	21
Total					11.697,591	208,513	20,851

* Os fatores de emissão da tabela acima são os oficiais para elaboração de inventários (Diretrizes do IPCC).

Premissas adotadas para o inventário do IPCC (Gomez, Watterson, 2006):

- Fatores de emissão Padrão para Caldeira a Gás Natural
- Ramo industrial de transformação
- Fator de emissão padrão de CO₂= 56.100 kg CO₂/TJ
- Fator de emissão padrão de CH₄= 1 kg CH₄/TJ
- Fator de emissão padrão de N₂O= 0,1 kg N₂O/TJ
- Poder calorífico do GN = 9430 kcal/m³ (@ 20°C e 1 atma) (Comgas, 2012a).

Tabela 17: Total de emissão dos gases de efeito estufa

	Total combustíveis
Emissões de CO ₂ (t)	11.697,591
Emissões de CH ₄ (t)	208,5132
Emissões de N ₂ O (t)	20,8513
GWP do CO ₂	1
GWP do CH ₄	25
GWP do N ₂ O	298
Emissões de CO₂eq (t)	23.124,115

¹ GWP oficial do IPCC para elaboração de inventários

Na tabela 17 temos as quantidades geradas dos gases de efeito estufa que são multiplicado pelo fator de GWP (Potencial de aquecimento global) totalizando as emissões de CO₂eq(t).

5.3 Cálculo financeiro da recuperação de créditos de carbono

Como resultado tem-se na tabela 18 um retorno financeiro de crédito de carbono de R\$ 213 mil reais por ano, usando como base o custo de 3,3 euros para cada crédito de carbono negociado no terceiro leilão de Crédito de Carbono na Bolsa de Valores de São Paulo em 12 de Junho de 2012 e a cotação do Euro do dia 06/09/2012 = 2,5993, resultando em um preço comercializado por tonelada de crédito de carbono R\$ 8,58/t CO_{2eq(t)}.

Tabela 18: Cálculo financeiro da recuperação de créditos de carbono

	Valores unitários
TOTAL ENERGIA (t CO _{2eq} /ton)	23.124,11
Preço Unitário em EUR (t CO _{2eq} /ton) ¹	3,30
Conversão Moeda (EUR- R\$) ²	2,5993
Total de créditos (R\$)	198.351,49

¹ Bolsa de valores de São Paulo em 12 de junho de 2012.

² Cotação do Euro em 06/09/12

6. RETORNO FINANCEIRO DO INVESTIMENTO

6.1 Método de avaliação financeira

Para uma avaliação adequada iremos fazer a avaliação do investimento usando quatro métodos, que são:

- Método do Payback Simples;
- Método do Payback Descontado;
- Método do Valor Presente Líquido
- Método da Taxa Interna de Retorno.

No estudo de caso estamos considerando os custos previstos do investimento do sistema de vácuo.

Valor do investimento: R\$ 9,3 milhões de implantação inicial, incluindo bombas mecânicas, obra civil, tubulação de vácuo, painéis elétricos, transformador de média tensão, cabos de média e baixa tensão, filtro de pó, válvulas de vácuo e sistema de controle automatizado.

- Vida útil do projeto: 10 anos
- Fluxos de caixa adicionais gerados pelo projeto ao longo da vida útil.
- Custo operacional do sistema existente – R\$ 6.138.788,00/ano demonstrado tabela 10
- Custo operacional do sistema proposto – R\$ 1.130.418,00/ ano demonstrado tabela 14
- Recuperação com crédito de carbono – R\$ 198.351,49/ano demonstrado tabela 18

6.2 Payback simples – PBS

O cálculo de PBS demonstrado na tabela 19 visa calcular o número de períodos ou quanto tempo o investimento irá precisar para recuperar o investimento realizado, na equação 5 e 6 podemos calcular o Payback simples.

$$V_{pb} = \frac{V_{inv}}{V_f} \quad (\text{Eq.5})$$

Vpb= Valor do Payback simples que deve ser convertido em anos.

Vinv= Valor do investimento

Vf= Valor do fluxo de caixa periódico esperado

$$Vf = Catual - Cn + Rcc \quad (\text{Eq.6})$$

Vf= Valor do fluxo de caixa periódico esperado

Catual= Custo operacional do sistema atual

Cn= Custo operacional sistema novo

Rcc= Recuperação crédito de carbono

Tabela 19: Cálculo de Payback simples

Ano	Fluxo de caixa	Saldo
0	(9.101.648,51)	(9.101.648,51)
1	5.206.721,79	(3.894.926,72)
2	5.206.721,79	1.311.795,06
3	5.206.721,79	6.518.516,85
4	5.206.721,79	11.725.238,63
5	5.206.721,79	16.931.960,42
6	5.206.721,79	22.138.682,20
7	5.206.721,79	27.345.403,99
8	5.206.721,79	32.552.125,77
9	5.206.721,79	37.758.847,56
10	5.206.721,79	42.965.569,34
Payback Simples		
1	ANOS	
9	MESES	

Através da tabela 19 conclui-se que o retorno do investimento usando o cálculo do Payback simples é 1 ano e 9 meses, sendo considerado um bom investimento com retorno rápido.

6.3 Payback descontado

Para o cálculo do Payback descontado, utilizamos o valor presente que é dado pela Equação 6 para calcular os fluxos monetários para a data que o projeto está sendo analisado.

O Payback descontado é obtido através do cálculo do saldo subtraindo o valor presente para a data considerada, dado pela equação 7 e 8 e conforme tabela 20.

Custo do capital de 12%

$$VP = \frac{FC_t}{(1 + i)^t} \quad (\text{Eq. 7})$$

VP= Valor presente

FC_t= Fluxo de caixa no período em anos

i= Custo de capital

t= Período de 1 ano.

$$Vpbd = Vsant - Vp \quad (\text{Eq.8})$$

Vpbd= Valor do saldo do Payback descontado

Vsant= Valor saldo anterior

VP= Valor presente

Tabela 20: Cálculo de Payback descontado

ANO	Fluxo de caixa	VP	SALDO
0	-	9.101.648,51	(9.101.648,51)
1	5.206.721,79	4.648.858,74	(4.452.789,77)
2	5.206.721,79	4.150.766,73	(302.023,04)
3	5.206.721,79	3.706.041,72	3.404.018,68
4	5.206.721,79	3.308.965,82	6.712.984,50
5	5.206.721,79	2.954.433,77	9.667.418,27
6	5.206.721,79	2.637.887,30	12.305.305,57
7	5.206.721,79	2.355.256,51	14.660.562,08
8	5.206.721,79	2.102.907,60	16.763.469,69
9	5.206.721,79	1.877.596,07	18.641.065,76
10	5.206.721,79	1.676.425,07	20.317.490,82

2 ANOS
1 MESES

Através da tabela 20 conclui-se que o retorno do investimento usando o cálculo do Payback descontado é 2 anos e 1 mês, sendo considerado um bom investimento com retorno rápido.

6.4 Valor presente líquido

Este critério consiste em calcular o valor presente dos fluxos monetários para a data que o projeto está sendo analisado, utilizando-se uma taxa de desconto. Caso o VPL seja maior que zero, o empreendimento é considerado atrativo. Caso seja menor que zero, o empreendimento não deve ser considerado atrativo. Caso o VPL seja igual a zero, o fato de considerar ou não o empreendimento atrativo é indiferente.

Normalmente, quando diferentes empreendimentos têm que ser comparados, devido ao fato de terem custo de investimentos distintos, assim como cronogramas de construção e outras variáveis, também distintas, este critério é o mais indicado.

“O método do VPL implicitamente, já considera no resultado as diferenças nos investimentos iniciais, neste caso, não sofre nenhuma distorção e aponta para a solução correta” (SOUZA; CLEMENTE, 1995).

Para o cálculo do Valor Presente Líquido que é dado pela Equação 9, utiliza a Taxa Interna de Retorno de 12% e tem-se:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (\text{Eq.9})$$

VPL= Valor presente Líquido

FC_t= Fluxo de caixa no período

i= Taxa interna de retorno ou custo de capital

t= Tempo em anos

O cálculo do VPL é a soma do valor presente relativo a todos os meses do período de 10 anos, obtidos na tabela 20.

VPL= R\$ 20.317.490,82

Como o resultado é bem superior à zero concluiu-se que o investimento é muito atrativo.

6.5 Taxa interna de retorno

Este critério consiste em calcular a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero. Caso a TIR do empreendimento seja maior que a taxa de desconto, o empreendimento é considerado atrativo. Caso seja menor que a taxa de desconto, o empreendimento não deve ser considerado atrativo. E, caso a TIR seja igual à taxa de desconto, o fato de considerar ou não o empreendimento atrativo é indiferente.

Comparando o critério do VPL com o critério da TIR, pode-se afirmar que o critério do VPL é mais preciso pelo fato deste levar em conta as diferenças nos investimentos iniciais.

A TIR de um investimento é o retorno exigido que resulta em VPL nulo quando usado como taxa de desconto (ROSS et al., 1998).

Podemos usar a equação 10 zerando o VPL.

$$VPL = 0 = Ii + \sum_{t=1}^N \left(\frac{Ft}{(1 + TIR)^t} \right) \quad (\text{Eq.10})$$

VPL= Valor presente líquido

Ii= Investimento inicial

Ft= Fluxo de caixa no período

TIR= Taxa Interna de Retorno

T= Tempo em anos

Calculando a taxa interna de retorno com base na tabela 20 obtêm-se:

$$TIR=57\%$$

A taxa interna de retorno em 57% indica um investimento mais atraente financeiramente.

7. COMPARATIVOS DAS TECNOLOGIAS

7.1 Comparativo financeiro

Nas tabelas 21 e 22 tem-se o comparativo dos custos operacionais das bombas com ejetor à vapor superaquecido e as bombas mecânicas, ficando evidente que os insumos para a produção de vapor são muito maiores do que a das bombas mecânicas que dependem exclusivamente de energia elétrica e podem ser operados apenas quando necessário seu uso.

Tabela 21: Comparativo do custo operacional das bombas a vapor e mecânicas

Descrição	Bombas a Vapor R\$/t	Bombas Mecânicas R\$/t
Energia elétrica		
Ventilador Caldeira	0,10	-
Bombas de recirculação de água	0,20	
Bombas elétricas secas		1,26
Gás Natural	7,63	
Tratamento de água Desmi	0,08	
Produtos químicos para Caldeira	0,05	
Manutenção	0,25	0,09
Inspeção anual	0,04	
Mão de obra dos operadores	0,59	
Tratamento de água industrial		-
Bombeamento de água industrial recalque 1.300 m ³ /h	0,02	
Bombeamento de água industrial Recirculação 1.300 m ³ /t	0,07	0,01
Bombeamento de água para o ciclone		0,35
Manutenção do sistema de Desgaseificação	0,18	
Nitrogênio		0,01
Total	9,21	1,71

Tabela 22: Comparativo do custo operacional

Sistemas de vácuo	Custo Operacional Anual	
Ejetor a vapor	R\$ 6.138.788	9,21 R\$/t
Bombas mecânicas	R\$ 1.130.418	1,71 R\$/t

Através da tabela 19 e 20 verifica-se que o custo operacional do sistema proposto gasta apenas 18,6 % do custo operacional do sistema existente.

7.2 Comparativo energético

Considerando o aproveitamento energético demonstrado na tabela 23 demonstra-se que o sistema proposto gasta apenas 8,3 % da energia do sistema atual.

Tabela 23: Comparativo energético do consumo mensal

Sistemas de vácuo	Consumo Energético
Ejetor a vapor	19.414 GJ
Bombas mecânicas	1.787 GJ

A diferença apresentada na tabela 23 demonstra que o sistema proposto oferece um ganho energético excelente frente ao atual, por ser mais simples com apenas um sistema convertendo a energia elétrica em sucção de ar e consecutivamente vácuo.

8 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi elaborar um estudo de custo benefício de um sistema existente de produção de vácuo em comparação com o sistema de bomba de vácuo mecânica seca de última geração que começou a ser comercializado no mundo a partir da última década para a fabricação de aço de construção mecânica.

Conclui-se que o sistema de bomba seca tem muitos benefícios em relação ao sistema antigo, tanto energético, financeiro e ambiental.

Considerando os impactos ambientais obtêm-se a eliminação da contaminação de sólidos no sistema de tratamento de água e geração de gases da combustão na operação da caldeira.

Considerando os impactos energéticos, obtêm-se a eliminação da perda de carga no transporte do vapor da Utilidade até a Aciaria, redução do consumo de energia elétrica com o desligamento das bombas de água industrial e do ventilador da torre de resfriamento, melhor aproveitamento energético porque o sistema proposto permite que a tubulação permaneça sob vácuo mesmo quando o sistema está desligado e no sistema de ejetores todas às vezes o vácuo tem que começar de 101 kPa (1 atm), e uma das características da caldeira é que ela não pode ser desligada ou esfriada continuamente porque os tubos tenderiam a rachar com as variações de temperatura, no caso do sistema novo é só desligar as bombas, implicando em uma redução de 91,7 % no consumo energético,

Considerando os impactos financeiros obtêm-se a redução de R\$ 6,1 milhões por ano com o consumo de Gás Natural, remanejamento de mão de obra dos operadores especializados e eliminação dos custos de manutenção da Caldeira, com uma redução de 81,4% de redução nos custos operacionais do sistema de vácuo, um pouco abaixo dos 97% que a Edwards divulgou para um sistema similar (Edwards,2012c), mas ainda assim é um excelente resultado.

Oportunidade de ganhos com recuperação dos créditos de carbono devido a eliminação da queima de combustível fóssil que totalizam retorno de 198 mil reais por ano.

REFERÊNCIAS

- AQUAFIL. Desaeradores térmicos modelo DST. Disponível em: <http://www.aquafil.com.br/desae.htm>. Acesso em 15 Jan. 2013.
- AMARAL, D. **História da Mecânica “O motor a vapor”**, Departamento de Eng. Mecânica EMA 078. Disponível em: http://www.demec.ufmg.br/port/d_online/diario/Ema078/historia%20do%20motor%20a%20vapor.pdf. Acesso em 20 mar. 2012.
- ANDRADE, A. S. **Máquinas Térmicas AT-101**. Universidade Federal do Paraná Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-AULA-03.pdf>. Acesso em 10 nov. 2012.
- BRASIL. **Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. Plano Nacional sobre Mudança do Clima**. Brasília, 2008. 129p.
- BRUCE, S. CHEETHAM, V. LEGGE, G. **Recent Operating Experience with Dry Running Vacuum Pumps on Vacuum Degassing and Vacuum Oxygen Decarburization systems**. ISSTech 2003: Conference Proceedings: Electric Furnace, Steelmaking, 2003. 895-909p.
- CEFET. Curso de Tecnologia em Eletromecânica. Disponível em : <http://www.ebah.com.br/content/ABAAe4zIAB/caldeiras>. Acesso em 20 Abr. 2012.
- COMGAS. **Tarifas do Gás Natural canalizado. Disponível em** <http://www.comgas.com.br/tarifas.asp>. Acesso em: 24 Jun 2012a.
- COMGAS. **Generalidades do Gás Natural canalizado. Disponível em** http://www.fiesp.com.br/sindicato/sindinstalacao_08/downloads/parte%2003%20generalidades.pdf. Acesso em: 21 Jun 2012b.
- COMPAGAS. **Cálculo do volume de Gás Natural canalizado para comercialização**. Disponível em <http://www.compagas.com.br/index.php/web/content/download/1242/5745/file/MANUAL%20INDUSTRIAL.pdf>. Acesso em: 20 Abr. 2012.
- EDWARDS. 2012a. **Vacuum and pressure for industrial and process applications**. Disponível em: [http://www.edwardsvacuum.com/asia/biofuels/pdf/BOC Edwards Industrial Brochure.pdf](http://www.edwardsvacuum.com/asia/biofuels/pdf/BOC_Edwards_Industrial_Brochure.pdf). Acesso em 24 nov. 2012.
- EDWARDS. 2012b. **GV400 Drystar**. Disponível em: <http://www.edwardsvacuum.com/Products/View.aspx?sku=A70661900> Acesso em 24 nov. 2012.

EDWARDS. 2012c. **Mechanical Vacuum Pump System for Steel Degassing**. Disponível em: <https://www.edwardsvacuum.com/uploadedFiles/Home/Markets_Served/Steel_Degassing/Steel%20Degassing%20application%20note%20P10008895B.pdf>. Acesso em 24 nov. 2012.

ENGENHARIA DO PROCESSO. Leito troca Iônica – Leito Misto. Disponível em : <http://www.epengenharia.com.br/texto-b44-leito troca ionica %20 leito misto.html>. Acesso em: 15 nov. 2012.

GARDNER DENVER. **Sistemas de vácuo híbridos, Ejetores a Vapor**. NASH. Disponível em: <<http://gdnash.com.br/pdf/ejetor.pdf>>. Acesso em 29 Abr. 2012.

GEA WIEGAND GmbH. **The Theory of Steam Jet Pumps**. Karlsrushe GmbH: TKI25. Disponível em: <<http://www.torr-engenharia.com.br/wp-content/uploads/2011/04/TKI-25.pdf>>. Acesso em: 20 Abr. 2012a.

GEA WIEGAND GmbH. **Jet Vacuum Systems**. Germany: GEA Process Engineering. 2010. 8p. Disponível em: <[http://www.gea-wiegand.com/geawiegand/cmsresources.nsf/filenames/P105e_Jet_Vacuum_Systems.pdf/\\$file/P105e_Jet_Vacuum_Systems.pdf](http://www.gea-wiegand.com/geawiegand/cmsresources.nsf/filenames/P105e_Jet_Vacuum_Systems.pdf/$file/P105e_Jet_Vacuum_Systems.pdf)>. Acesso em: 29 Abr. de 2012b.

GÓMEZ.D.R, WATTERSON J.D. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Chapter 2 Stationary Combustion. 2006

GOULART,F.A, Barberino.N.P. **Metodologia e Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Conversão de Caldeiras a óleo Combustível para Gás Natural**. Universidade Federal da Bahia, mar. 2003.

HARRIS,N; **Modern Vacuum Practice**. 3. ed. Glasgoow: Bell and Bain Ltda, 2005. 457p.

HEAT EXCHANGE INSTITUTE. **Vacuum Systems: Understanding A Key Component of a Modern Power Plant**. #110. Cheveland: Heat Exchange Institute. 3-15p. Disponível em: <<http://www.heatexchange.org/pub/pdf/edu/Tech%20Sheet%20110.pdf>>. Acesso em: 28 abr de 2012.

IPCC, 2007a. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007**. Geneva: IPCC, 2007.

LEITE,N.R, MILITÃO.R.A. **TIPOS E APLICAÇÕES DE CALDEIRAS**. 2008.40 f. Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica.2008.

MATAIX, Cláudio; **“Turbomáquinas Térmicas”**; Madrid; Espanha; Editorial Dossat; 1973.

OMEL BOMBAS E COMPRESSORES. **Sopradores rotativos de deslocamento positivo SRT**. Disponível em: < http://www.omel.com.br/BR/compressores_sopradores.php>. Acesso em 29 Abr. 2012.

PINTO, M.M. **Química Industrial. Tratamento de água e efluentes industriais**. Disponível em <http://www.webinbox.com.br/upload/deprctufesbr/mmpqi_aula_3_-_tratamento_de_aguas_e_efluentes_industriais.ppt>. Acesso em 05 Maio. 2012.

ROSS et al., 1998, p. 174 – **Princípios de administração financeira**. São Paulo: Atlas, 1998.

RYANS,J.L, BAYS,L. **Run Clean with dry vacuum pumps**. **Chemical Engineering Progress**, Oct 2001. Page 32-41.

SILVEIRA, J. L.;TUNA, C. E. Thermoeconomic Analysis Method for Optimization of Combined Heat and Power Systems. Part I. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.29, n.1, p.479-485, 2003.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE, Ademir. **Decisões Financeiras e Análise de Investimentos**. São Paulo: Ed. Atlas, 1995.

TENGLER, A. **Maintenance Issues With Traditional and Advanced Vacuum Pump Technology**: AIMCAL Fall Conference & 18th International Conference on Vacuum,10., 2004, Charlostn. SC USA.